

# **Università degli Studi di Napoli Federico II**



## **Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale**

Corso di Dottorato di ricerca in:  
Ingegneria dei Sistemi Idraulici, di Trasporto e Territoriali XXVII ciclo

Indirizzo:  
Infrastrutture viarie e Sistemi di Trasporto

Titolo della tesi:  
**"Un modello di guida per la simulazione dei sistemi ferroviari con  
segnalamento a blocco mobile hard wall e soft wall"**

**Relatore:**

**Prof. ing. Vincenzo Torrieri (tutor)**

**Prof. ing. Vincenzo Punzo**

**Dott. ing. Marcello Montanino**

**Contro relatore:**

**Prof. ing. Luca D' Acierno**

**Candidata:**

**Ing. Deborah Sanzari**

## Sommario

Sommario	1
Indice delle figure	5
1 Introduzione	12
2 Il moto del veicolo isolato	14
2.1 Introduzione	14
2.2 Il modello dinamico teorico	14
2.2.1 Lo sforzo di trazione	15
2.2.2 La forza di aderenza	16
2.2.3 Le resistenze al moto	19
2.2.4 Lo sforzo frenante	21
2.2.4.1 Tipologie di freni su rotabili ferroviari	26
2.2.4.1.1 Freno pneumatico	26
2.2.4.1.2 Freno elettrodinamico	35
2.2.4.1.3 Freno elettromagnetico	36
2.2.4.2 Tipologie di controllo del freno	38
2.3 Il modello cinematico teorico	39
2.3.1 Fase di avviamento	40
2.3.2 Fase di regime	42
2.3.3 Fase di arresto	43
2.4 Modelli di frenatura	46
2.4.1 Il modello di frenatura per le linee ad Alta Capacità	46
2.4.2 Il modello di frenatura per le linee convenzionali	48
2.4.3 Il modello di frenatura RFI	50
2.4.4 Il modello di frenatura per le linee ad Alta Velocità: le curve dell'E.R.A.	63
2.4.4.1 La funzione di supervisione	63

2.4.4.2	Il modello di frenatura per i treni a composizione fissata (Gamma train braking model)	72
2.4.4.3	Il modello di frenatura per i treni a composizione variabile (Lambda train braking model)	75
2.4.4.4	Impatto delle curve di frenatura ETCS sull'headway di linea	76
3	Il segnalamento ferroviario: principi e tecnologie	79
3.1	Principi generali di sicurezza del traffico ferroviario	79
3.2	Il distanziamento dei veicoli in sicurezza: tipi di blocco	88
3.3	Impianti di segnalamento per la circolazione in piena linea	102
3.4	Impianti di segnalamento per la circolazione in ambito stazione	120
3.5	L'organizzazione della dirigenza movimento	136
3.6	Le funzioni di comando e controllo automatico del veicolo e del traffico ferroviario	147
3.6.1	Automatic Train Protection (A.T.P.)	148
3.6.1.1	ATP con trasmissione continua	153
3.6.1.2	ATP con trasmissione discontinua	158
3.6.2	Automatic Train Operation (A.T.O.)	159
3.6.3	Automatic Train Supervision (A.T.S.)	162
3.6.4	Automatic Train Control (A.T.C)	162
3.7	Il Modello del tempo di blocco (Blocking Time Model)	164
3.7.1	Tempo di blocco per ETCS Livello 1	169
3.7.2	Tempo di blocco per ETCS Livello 1 con Infill	173
3.7.3	Tempo di blocco per ETCS Livello 2	174
3.7.4	Tempo di blocco per ETCS Livello 3	177
3.8	Il segnalamento sulle linee Alta Velocità: lo standard ERTMS/ETCS	181
3.8.1	I livelli operativi dell'ETCS	183
3.8.1.1	ETCS – Livello 0	183

3.8.1.2	ETCS – Livello STM	184
3.8.1.3	ETCS – Livello 1	185
3.8.1.4	ETCS – Livello 2	190
3.8.1.5	ETCS - Livello 3	191
4	I modelli di simulazione del traffico ferroviario	194
4.1	Introduzione	194
4.2	I modelli di simulazione macroscopici	197
4.2.1	Il modello NEMO	198
4.2.2	Il modello SIMONE	199
4.3	I modelli di simulazione mesoscopici	201
4.4	I modelli di simulazione microscopici	201
4.4.1	Il software Open Track	202
4.4.2	Il software RailSys	207
4.5	I modelli di simulazione ibridi	209
4.6	I modelli di simulazione sincroni ed asincroni	211
4.7	I modelli di simulazione deterministici e stocastici	213
4.8	La simulazione nella pianificazione e gestione dei sistemi ferroviari	214
4.8.1	Verifica della stabilità dell’orario di esercizio e della rete ferroviaria	220
4.8.2	Definizione del minimo headway di linea	221
4.8.3	Progettazione robusta dell’orario di esercizio	231
4.8.4	Correzione in tempo reale dell’orario di esercizio	235
4.8.4.1	Rescheduling con simulazione asincrona	236
4.8.4.2	Rescheduling con simulazione sincrona	237
4.8.4.3	Tecniche di ottimizzazione	237
5	Il modello di guida	240
5.1	Introduzione	240

5.2	Architettura generale del sistema	243
5.3	Il modello del materiale rotabile	245
5.4	Il modello dell'EVC	246
5.5	Il modello dell'infrastruttura	247
5.6	Il modello dell'orario di esercizio	247
5.7	Il modello del segnalamento	247
1.1.	Il modello fisico del moto del veicolo	248
5.8	Il modello di guida	251
5.9	Applicazione del modello di guida per il calcolo della capacità di linea	262
5.10	Il caso studio: la linea Cumana	263
6	Conclusioni	269
	Appendice	271
	Bibliografia	277

## Indice delle figure

Figura 1.	Andamento tipico della Caratteristica Meccanica dei vari tipi di motori	16
Figura 2.	Modello di aderenza di Curtius e Kniffler (1943)	18
Figura 3.	Andamento tipico della Caratteristica Meccanica di Trazione di un veicolo	18
Figura 4.	La resistenza al moto dovuta alla pendenza del tracciato	20
Figura 5.	Schema della ruota frenata	22
Figura 6.	Freno meccanico: schema delle forze agenti	23
Figura 7.	Abaco per la determinazione del peso frenato di un veicolo ferroviario	25
Figura 8.	Schema a blocchi con le principali componenti del freno pneumatico	27
Figura 9.	Schema di funzionamento del freno pneumatico con leva in posizione "Carica"	30
Figura 10.	Schema di funzionamento del freno pneumatico con leva in posizione "Servizio"	31
Figura 11.	Schema di funzionamento del freno pneumatico con leva in posizione "Tenuta"	32

Figura 12. Freno a ceppi	33
Figura 13. Freno a dischi	35
Figura 14. Curva caratteristica freno elettrodinamico (UNI EN 14531-1)	36
Figura 15. Curva caratteristica freno a pattini (UNI EN 14531-1)	37
Figura 16. Curva caratteristica freno a correnti di Foucauld (UNI EN 14531-1)	38
Figura 17. Diagramma di marcia: fase di avviamento	41
Figura 18. Diagramma di marcia: fase di regime	43
Figura 19. Diagramma di marcia: fase di arresto	45
Figura 20. Lo spazio di arresto secondo la UNI EN 14352	47
Figura 21. Il profilo di velocità in fase di arresto secondo la UNI EN 14352	47
Figura 22. Prestazioni in frenatura nominali per treno regionale secondo la norma (UNI EN 14352)	49
Figura 23. Tabella delle velocità massime consentite in base alla norma RFI Prefazione Generale all'Orario di Servizio	50
Figura 24. Schema dell'ATP di tipo SCMT	51
Figura 25. Curva di protezione per SCMT	52
Figura 26. La funzione della decelerazione "a gradino" del modello di frenatura SCMT	54
Figura 27. Variabili di ingresso/uscita del modello di frenatura SCMT	56
Figura 28. Diagramma di flusso dell'algoritmo del modello di frenatura SCMT	57
Figura 29. Decelerazione nominale secondo la norma UIC 544-1	61
Figura 30. Le regioni di supervisione secondo lo standard ETCS	64
Figura 31: Curva di frenatura di emergenza e punti di supervisione dello standard ETCS	66
Figura 32. Invito a decelerare per il macchinista prima che la Permitted speed inizi a diminuire	67
Figura 33. Superamento della Permitted speed e messaggio di Warning	68
Figura 34. Funzioni a scalino delle aliquote della decelerazione di emergenza	70
Figura 35. Involuppo dei punti della curva di Emergency Braking Deceleration (EBD curve)	70
Figura 36. Compensazione del profilo altimetrico del tracciato in funzione della lunghezza del convoglio	71

Figura 37. Schema a blocchi dei dati di scambio tra sottosistema ETCS di terra e sottosistema ETCS di bordo per il calcolo della curva di frenatura di emergenza (EBD curve)	72
Figura 38. Dispersione del valore di decelerazione su rotaie asciutte	74
Figura 39. Schema a blocchi dei dati di scambio nel modello di frenatura per treni a composizione fissata (Gamma train braking model)	75
Figura 40. ATP privo di cab signalling	77
Figura 41. Corrispondenza tra i punti di supervisione ETCS ed il segnalamento a tra aspetti	78
Figura 42. Impatto della curva di frenatura EBD sull'headway di linea	78
Figura 43. Evoluzione dei fattori fondamentali della sicurezza nel tempo	80
Figura 44. Incrocio	84
Figura 45. Modifica della sede di incrocio dalla località C a B	85
Figura 46. Precedenza normale in B del treno 4 sul treno 2	85
Figura 47. Itinerario di arrivo e zona di uscita	88
Figura 48. Segnalamento a due aspetti	89
Figura 49. Segnalamento a tre aspetti	90
Figura 50. Circuito di binario	90
Figura 51. Circolazione con bastone pilota	93
Figura 52. Circolazione con distanziamento ad intervallo di tempo	95
Figura 53. Distanziamento con blocco fisso e trasmissione discontinua	98
Figura 54. Distanziamento con blocco fisso e trasmissione continua	99
Figura 55. Tipi di blocco mobile	100
Figura 56. Distanziamento minimo con blocco mobile relativo	101
Figura 57. Posto di Blocco Intermedio su una linea a singolo binario	104
Figura 58. Regime del consenso telefonico	108
Figura 59. Blocco elettrico manuale	109
Figura 60. Istrumento di blocco	110
Figura 61. Dispositivi di campagna	111
Figura 62. Circuito di binario libero (in alto) ed occupato (in basso)	113
Figura 63. Sequenza di codici	114
Figura 64. Blocco conta assi	116

Figura 65: Blocco conta assi con posto di blocco intermedio	117
Figura 66: Blocco mobile e Trasmissione Radio	119
Figura 67: Transizione tra aree controllate nel CBTC	120
Figura 68: Condizioni di ciclo	121
Figura 69: Apparato meccanico	123
Figura 70: Schema di funzionamento di un apparato centrale	126
Figura 71: Banco di manovra di un Apparato Centrale Elettrico a leve singole	127
Figura 72: Banco di manovra ed armadio di un ACEI	129
Figura 73: Architettura funzionale di un ACS	131
Figura 74: Posto Periferico (Ansaldo STS)	133
Figura 75: Apparato centrale meccanico	135
Figura 76: Apparato centrale elettrico	135
Figura 77: Schema del regime di esercizio a Dirigenza Locale	140
Figura 78: Schema del regime a Dirigenza Centrale	142
Figura 79: Schema del regime di esercizio a Dirigenza Unica	143
Figura 80: Schema del regime di esercizio a Dirigenza Centrale Operativa	144
Figura 81: Schema di un impianto di CTC	145
Figura 82: Sala operativa di un posto centrale in CTC	147
Figura 83: Profili di decelerazione per la funzione di supervision di ATP (Gregor & Sergej, 2009)	148
Figura 84. Funzione di supervisione di ATP: Statit Speed Profile e Dynamic Speed Profile (Gregor & Sergej, 2009)	150
Figura 85: Segnalamento a due aspetti (rosso/verde)	151
Figura 86: Criticità del segnalamento a due aspetti (rosso/verde)	152
Figura 87: L'overlap tra sezioni di blocco	152
Figura 88: Il distanziamento con blocco fisso	153
Figura 89: ATP con trasmissione continua	154
Figura 90: ATP con supervisione a mezzo di curva di frenatura a scalino (Gregor & Sergej, 2009)	154
Figura 91: Trasmissione continua a mezzo di correnti codificate	155
Figura 92: Dati trasmessi attraverso le correnti codificate	156



Figura 93: ATP continuo tradizionale ed ATP continuo con trasmissione della distanza a procedere (distance to go) _____	157
Figura 94: Curve di frenatura per guida manuale _____	158
Figura 95: Trasmissione segnale discontinua (ATP discontinuo) _____	159
Figura 96: Funzionamento del sistema ATO _____	160
Figura 97: Il sistema ATO in ambito stazione _____	161
Figura 98: Automatic Train Supervision con blocco fisso _____	162
Figura 99: Automatic Train Supervision con blocco mobile _____	163
Figura 100: Aliquote del tempo di blocco _____	166
Figura 101: Diagramma dei tempi di blocco e distanziamento temporale teorico per una linea con blocco fisso _____	167
Figura 102: Tempi di blocco e punti di conflitto _____	168
Figura 103: Tempo di blocco per ETCS L1 _____	171
Figura 104: Tempo di blocco per ETCS L1 con Infill _____	174
Figura 105: Tempo di blocco per ETCS L2 _____	177
Figura 106: Ritardi di trasmissione ed elaborazione per ETCS L3 _____	179
Figura 107: Casi di arresto in sicurezza con blocco mobile relativo (Daniel, 2008) ____	180
Figura 108: Distanziamento con blocco mobile assoluto o relativo. Caso A: distanza di arresto assoluta di servizio. Caso B: distanza di arresto relativa di servizio. Caso C1: Distanza di emergenza massima relativa. Caso C2: Distanza di servizio massima relativa. (Daniel, 2008) _____	181
Figura 109: Operatività ETCS Livello 0 _____	183
Figura 110: Scheda riassuntiva ETCS Livello 0 _____	184
Figura 111: Operatività ETCS Livello 1 _____	185
Figura 112: Operatività ETCS Livello 1 con Infill _____	186
Figura 113: Componenti tecnologiche nell'ETCS Livello 1 _____	187
Figura 114: Componenti tecnologiche nell'ETCS livello 1 Infill _____	188
Figura 115: Aggiornamento della Movement Authority con dispositivo infill _____	189
Figura 116: Scheda riassuntiva ETCS Livello 1 _____	189
Figura 117: Operatività ETCS Livello 2 _____	190
Figura 118: Componenti tecnologiche nell'ETCS Livello 2 _____	191
Figura 119: Operatività ETCS Livello 3 _____	192

Figura 120: Componenti tecnologiche nell'ETCS Livello 3	193
Figura 121. I grafi a nodi semplici ed a nodi doppi	196
Figura 122. Confronto tra il modello di rete microscopico e macroscopico	196
Figura 123. Struttura del tool NEMO (Kettner et al. 2003)	198
Figura 124. Schema dell'architettura del tool SIMONE	200
Figura 125. Architettura del software OpenTrack (Nash, Huerlimann, 2004)	203
Figura 126. Esempio del modello di rete nel software OpenTrack	204
Figura 127. Esempio di diagramma spazio-velocità fornito da OpenTrack	205
Figura 128. Applicazione frenatura con blocco fisso (Huerlimann, Mastella, OpenTrack versione 1.4)	206
Figura 129. Applicazione frenatura con blocco mobile assoluto (Huerlimann, Mastella, OpenTrack versione 1.4)	207
Figura 130. Schema dell'architettura modulare del software RailSys	207
Figura 131. Schema della procedura di definizione del timetable in RailSys (Bendfeldt et al., 2000)	208
Figura 132. Alcune interfacce grafiche utente (GUI) del software RailSys	209
Figura 133. Conversione automatica del modello di rete microscopico di RailSys nel modello macroscopico di NEMO (Kettner et al., 2003)	210
Figura 134. Interfaccia tra RailSys (server) e NEMO (client). (Kettner et al., 2003)	211
Figura 135. Esempi di distribuzioni di probabilità dei tempi di percorrenza di alcune tratte della linea Cumana (EAV)	213
Figura 136. Variabili di ingresso e di uscita di un sistema	215
Figura 137. Schema della stazione di scambio Weesp. (Middelkoop, Bouwmann, 2002)	220
Figura 138. Ritardi alla partenza (a) e percentuale di coincidenze sopresse (b) in caso di raddoppio del binario in una stazione di scambio con diversi disturbi (Middelkoop, Bouwmann, 2002)	221
Figura 139. Minimo Headway in funzione della velocità massima di linea per diversi sistemi di segnalamento. (Hill, Yates, 1992)	222
Figura 140. Schema di sezioni di blocco equi distanziate per una linea metropolitana (Chang, Du, 1998)	224
Figura 141. (a) Griglia del modello CA; (b) Traiettorie veicoli con blocco mobile assoluto per $v_{\max} = 20$ celle/update ( $\sim 42$ km/h) e $t_d = 10$ updates (10 s). (Tang e Li, 2007)	226

Figura 142. Distanziamento minimo spaziale: a) con blocco mobile; b) blocco fisso e trasmissione continua; c) con blocco fisso e trasmissione discontinua. (Hill e Yates, 1992)	227
Figura 143. Fase di approccio in stazione: a) $v_{\max} = 20$ celle/update, $t_d = 10$ updates ; b) $v_{\max} = 20$ celle/update, $t_d = 40$ updates. (Tang e Li, 2007)	228
Figura 144. (a) Relazione tra il minimo headway e massima velocità per $t_d = 10$ updates (curva tratteggiata) e $t_d = 20$ updates; (b) Relazione tra portata e massima velocità per $t_d = 20$ updates	229
Figura 145. Distanziamento minimo con blocco mobile assoluto (PMB). (Takagi, 2012)	229
Figura 146. Controllo sincronizzato per ridurre il departure-to-arrival headway con blocco mobile assoluto, $t_B = 25$ s (Takagi, 2012)	231
Figura 147. Processo stocastico degli eventi nel metodo di ottimizzazione stocastico sviluppato da Kroon et al. (2007)	233
Figura 148. Ritardo totale in funzione del tempo di sosta (a); Ritardo del singolo treno in funzione del tempo di sosta (b). (XU et al., 2012)	234
Figura 149. Ritardo totale in funzione della lunghezza del veicolo e del tempo di sosta (a); Ritardo del singolo treno in funzione della lunghezza del veicolo a parità di intertempo (b). (XU et al., 2012)	235
Figura 150. Schema della procedura di rescheduling (D'Ariano et al., 2007)	239
Figura 151. Distanza minima di sicurezza con blocco mobile assoluto e blocco mobile relativo	242
Figura 152. Schema dell'architettura del modello	245
Figura 153. Schema di arresto in sicurezza del modello di Gipps	254
Figura 154. Spazi di arresto secondo il modello di Gipps	255
Figura 155. Scansione temporale del processo di guida	257
Figura 156. Processo di guida per la partenza da una stazione	259
Figura 157. Verifica strategia in accelerazione	261
Figura 158. Verifica strategia a regime	261
Figura 159. Strategia in decelerazione di servizio (curva SBD)	261
Figura 160. Impianti segnalamento linea Cumana	264

# 1 Introduzione

Il processo di pianificazione e gestione di un sistema di trasporto è finalizzato al raggiungimento dell'equilibrio tra domanda di trasporto ed offerta del servizio nel rispetto dei vincoli imposti dai costi di produzione.

La produzione dei servizi di trasporto in un determinato dominio spazio-tempo è limitata dalla *capacità* del sistema di trasporto che dipende dalle dimensioni fisiche dell'infrastruttura, cioè dalla *capacità dell'infrastruttura*, dal numero di veicoli, cioè dalla *capacità del parco veicolare*, e dall'*organizzazione* del sistema cioè dall'orario di esercizio e dal regime di circolazione attuato.

Per incrementare la capacità si possono attuare strategie di breve termine o di medio-lungo termine: se s'interviene sull'organizzazione del servizio di trasporto si possono ottenere variazioni di produzione nel breve periodo, mentre gli interventi infrastrutturali apportano benefici nel medio-lungo periodo.

Nel caso del trasporto ferroviario, l'organizzazione del servizio è fortemente condizionata dagli impianti tecnologici utilizzati per garantire la sicurezza della circolazione veicolare; infatti, i sistemi ferroviari tradizionali sono sistemi a *densità controllata* in quanto sono utilizzati sistemi di supervisione e controllo per regolare la densità del flusso veicolare. In generale, tali sistemi sono indicati come *sistemi di segnalamento*.

I moderni sistemi di segnalamento realizzano un distanziamento a *blocco mobile* grazie al quale il sistema di trasporto ferroviario può essere assimilato a quelli a *densità libera*. A seconda delle ipotesi assunte per calcolare il distanziamento minimo di sicurezza, si distinguono: *blocco mobile assoluto* (detto anche "hard wall moving block") e *blocco mobile relativo* (detto anche "soft wall moving block").

Per calcolare la capacità dell'infrastruttura di un sistema di trasporto si ricorre a modelli di simulazione del traffico implementati in codici di calcolo. Lo studio dei software commerciali più diffusi ha evidenziato alcune carenze tra le quali la non piena rispondenza alla normativa di riferimento e la non adeguatezza dei modelli matematici applicati. Inoltre, lo studio degli effetti sulle prestazioni di linea del blocco mobile relativo risulta ancora limitato al comparto accademico e, tuttavia, la trattazione modellistica è alquanto modesta se non assente.

L'assenza di modelli di simulazione del blocco mobile relativo è, molto probabilmente, dovuta al forte scetticismo che tale tipo di distanziamento genera negli operatori di settore; infatti, i requisiti attesi dalle tecnologie necessarie a realizzare il blocco mobile relativo non sono ancora pienamente soddisfatti; in particolare, sussistono ancora dei problemi relativi ai tempi di trasmissione delle informazioni tra le componenti di terra e quelle di bordo ed all'accuratezza dei sistemi per il rilevamento della posizione dei veicoli e la verifica di integrità.

Tuttavia, dal momento che l'ostacolo alla diffusione del blocco mobile relativo è di natura meramente tecnologica, è forte la convinzione che sia opportuno indirizzare comunque la ricerca scientifica di settore verso lo sviluppo di modelli di simulazione che possano costituire un valido supporto per lo studio e la previsione degli effetti indotti su sistemi ferroviari reali.

La non rispondenza ai requisiti normativi, inoltre, è un aspetto non trascurabile anche se le applicazioni sono a scopo di pura ricerca. Infatti, le dinamiche che caratterizzano le diverse fasi del moto di un veicolo (avviamento, regime, frenatura) sono complesse ed, in quanto tali, descritte attraverso variabili aleatorie. Nella pratica professionale l'incertezza sui valori che assumono queste variabili è, generalmente, risolta attraverso l'introduzione di coefficienti correttivi e margini di sicurezza. La scelta del valore da assegnare a tali coefficienti e margini di sicurezza è dettata dall'esperienza e dal livello di sicurezza che si deve garantire su una certa infrastruttura.

Nel contesto europeo lo sviluppo e l'ammodernamento del trasporto ferroviario è orientato ad aumentare sia l'attrattività del sistema che l'interoperabilità sulle tratte transnazionali. L'interoperabilità presuppone un'uniformazione delle componenti infrastrutturali, del parco veicolare, delle tecnologie e delle procedure alla base dell'organizzazione dei diversi sistemi ferroviari nazionali.

Non a caso, infatti, uno dei tanti obiettivi del progetto europeo *European Railway Traffic Management System* (ERTMS) è quello di uniformare i modelli di calcolo adoperati nei sistemi di supervisione e controllo della circolazione attraverso la definizione di uno standard operativo specifico per i sistemi di segnalamento indicato con l'acronimo ETCS (*European Train Control System*).

In tale contesto il presente lavoro di ricerca è stato finalizzato nello specifico a sviluppare un modello per la simulazione dei sistemi ferroviari con blocco mobile soft wall e, più in generale, a sviluppare non solo un modello di simulazione applicabile ai diversi sistemi di blocco, ma anche privo di quelle problematiche sostanziali riscontrate nei modelli commerciali esistenti.

L'applicazione del modello sviluppato ad una rete ferroviaria reale ha consentito, inoltre, di definire quantitativamente gli effetti del blocco mobile relativo, in termini di variazione della capacità di linea rispetto a quella realizzata con gli altri tipi di blocco.

## 2 Il moto del veicolo isolato

*In questo capitolo si fornisce un quadro sintetico dei modelli utilizzati per la descrizione del moto fisico del veicolo isolato sia dal punto di vista cinematico che dinamico. Sono approfondite, in particolare, le problematiche relative alla fase di arresto quali l'aderenza disponibile e l'influenza dei diversi tipi di apparati frenanti dei rotabili. Sono, inoltre, descritti i modelli di frenatura utilizzati nella progettazione e verifica delle linee convenzionali, di quelle ad Alta Capacità e Alta Velocità così come definiti dai principali riferimenti normativi (norme UNI e standard ETCS).*

### 2.1 Introduzione

In Meccanica il moto di un corpo può essere descritto sia attraverso un *modello cinematico* che attraverso un *modello dinamico*. Se il fenomeno del movimento è descritto senza considerare le cause che lo determinano si tratta di un modello cinematico; se, invece, sono studiate le forze che causano il movimento si tratta di un modello dinamico.

Anche per lo studio del moto di un veicolo è possibile, pertanto, ricorrere ad un modello cinematico e/o ad un modello dinamico. La scelta del tipo di modello è dettata, naturalmente, dallo scopo dell'analisi.

Nel presente capitolo si fornisce dapprima una descrizione dei modelli teorici cinematici e dei modelli teorici dinamici più utilizzati nel settore dei trasporti terrestri.

L'analisi dettagliata delle fasi caratteristiche del moto (avviamento, regime e frenatura) consente di evidenziare le principali problematiche nonché i parametri e le variabili di interesse per lo sviluppo di un modello di guida.

Successivamente, sono descritti alcuni dei modelli di avviamento e di frenatura principalmente utilizzati per la progettazione e verifica dei sistemi di trasporto ferroviario.

### 2.2 Il modello dinamico teorico

La legge fondamentale della dinamica di un punto materiale, conosciuta anche come *seconda legge di Newton*, è:

$$\mathbf{F} = m \cdot \mathbf{a}$$

Essa esprime l'interazione del punto con l'ambiente circostante: la forza  $\mathbf{F}$  determina l'accelerazione del punto ovvero la variazione della sua velocità nel tempo ed  $m$  è la cosiddetta

*massa inerziale* del punto cioè l'inerzia (la resistenza) del punto a variare il proprio stato di moto o di quiete ( $v = 0$ ).

Pertanto, se un veicolo è considerato come un punto massa, la seconda legge di Newton esprime la relazione tra la risultante delle forze agenti sul veicolo e l'accelerazione del veicolo stesso.

Nel settore trasportistico, la seconda legge di Newton viene riscritta in una forma nota come *equazione fondamentale della trazione*:

$$F_{attiva} + R = m \cdot a$$

dove:

$F_{attiva}$  è la risultante delle forze attive (ad esempio, lo sforzo di trazione o lo sforzo frenante);

$R$  è la risultante delle forze che si oppongono alle forze attive;

$m \cdot a$  è la forza di inerzia.

La caratterizzazione delle forze attive che agiscono sul veicolo dipende da quale variazione si vuole imporre al modulo del vettore velocità cioè se si vuole accelerare, decelerare o mantenere velocità costante.

### 2.2.1 Lo sforzo di trazione

Lo sforzo di trazione (o di tiro) applicato alla periferia delle ruote motrici (cd. “sforzo di trazione indotto”) è fornito dal motore del veicolo e dipende dalla potenza del motore.

La potenza di un motore può essere espressa come il prodotto tra la velocità angolare (di rotazione)  $\omega$  e la coppia motrice  $C$  al suo albero:

$$P = C \cdot \omega$$

Nella meccanica della locomozione terrestre la curva che lega la coppia motrice  $C$  alla velocità di rotazione dell'albero motore  $\omega$  è definita *Caratteristica Meccanica*.

Un apparato motore “ideale” è quello in cui è possibile sfruttare la massima potenza ad ogni velocità, in qualsiasi condizione del tracciato (salita, curva) ed in qualunque fase del moto (avviamento e regime).

Pertanto, nel caso di motore ideale tale curva è costituita da una retta orizzontale, mentre la curva che lega la coppia motrice  $C$  alla velocità angolare  $\omega$  è un'iperbole equilatera.

In trazione terrestre il legame cinematico tra rotazione del motore e velocità di avanzamento del veicolo è, in prima approssimazione, rigido. Infatti, se si prescinde dagli organi di trasmissione e si

considera l'albero motore collegato direttamente alle ruote motrici, il moto di avanzamento del veicolo è diretta conseguenza della rotazione dell'albero motore ai diversi regimi di rotazione.

Nella propulsione di un mezzo di locomozione si possono avere diversi modi per trasformare l'energia cinetica:

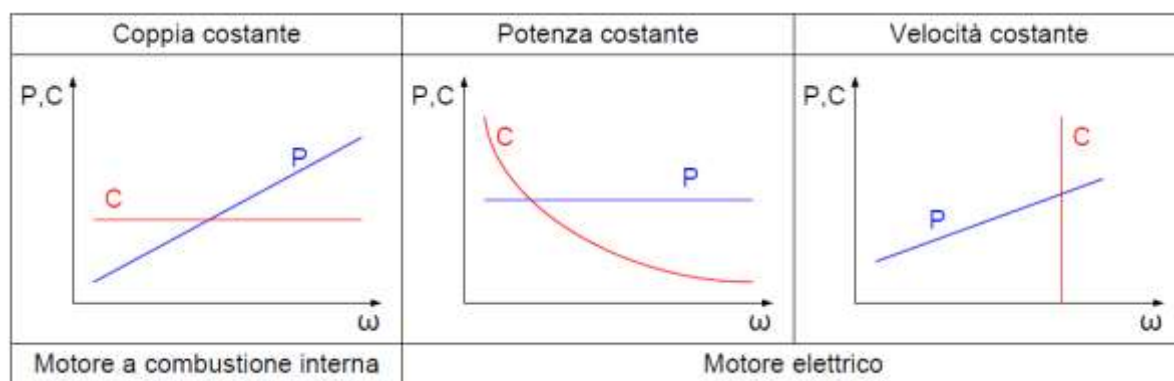
- nei motori termici si ha una trasformazione di energia chimica in energia termica e, quindi, in energia meccanica. Questo giustifica il basso rendimento dei motori a combustione interna;
- nei motori elettrici avviene una trasformazione di energia elettrica in energia meccanica.

I motori più comunemente utilizzati in trazione sono, generalmente, distinti in:

- motori a potenza costante cioè che, per loro natura, si avvicinano al motore ideale;
- motori a coppia costante;
- motori a numero di giri costante.

Nel primo gruppo rientrano tutti i motori nei quali la coppia motrice varia in proporzione inversa alla velocità come, ad esempio, i motori a vapore, i motori elettrici eccitati in serie che possono essere a corrente continua o monofase.

Nel secondo gruppo rientrano i motori a combustione interna (a scoppio ed a Diesel) e nel terzo gruppo i motori elettrici a campo magnetico rotante (detti anche ad eccitazione in parallelo).



**Figura 1. Andamento tipico della Caratteristica Meccanica dei vari tipi di motori**

### 2.2.2 La forza di aderenza

Il sistema ferroviario è un sistema a guida vincolata e ciò significa che le forze che si esercitano nell'area di contatto ruota-rotaia sono solo quelle necessarie alla variazione della componente tangenziale della velocità di avanzamento.

Come è ben noto, affinché il veicolo passi da uno stato di quiete ad uno di moto è necessario non solo che sia applicata una forza di trazione sufficiente a vincere le forze che si oppongono al moto,



ma che si verifichino anche particolari condizioni tra le forze che nascono nell'area di contatto tra ruota e rotaia (le cd. condizioni di aderenza).

In meccanica l'*aderenza* è definita come la forza che si stabilisce tra due superfici a contatto sottoposte ad un'azione ortogonale al piano di contatto. Nel sistema ruota-rotaia la forza ortogonale al piano di contatto tra le due superfici è il carico verticale del veicolo; le superfici si deformano per effetto della forza peso  $P$  e nell'area di contatto si originano degli sforzi tangenziali la cui risultante è definita forza di aderenza:  $A = \int_S t \cdot dA$ .

Il moto delle ruote risulta roto-traslatorio solo se nell'area di contatto ruota-rotaia la forza di aderenza  $A$  risulta maggiore della risultante delle forze attive applicate alla ruota nella stessa area di contatto.

La forza di aderenza dipende dal carico verticale che effettivamente grava su ciascuna ruota; durante il moto del veicolo la distribuzione del peso non è uniforme, pertanto si definisce *peso aderente* ( $P_a$ ) il carico verticale disponibile per generare forza aderente. Con tale assunzione, la forza di aderenza è espressa come:

$$A = f_a \cdot P_a$$

dove  $f_a$  è definito *coefficiente di aderenza*.

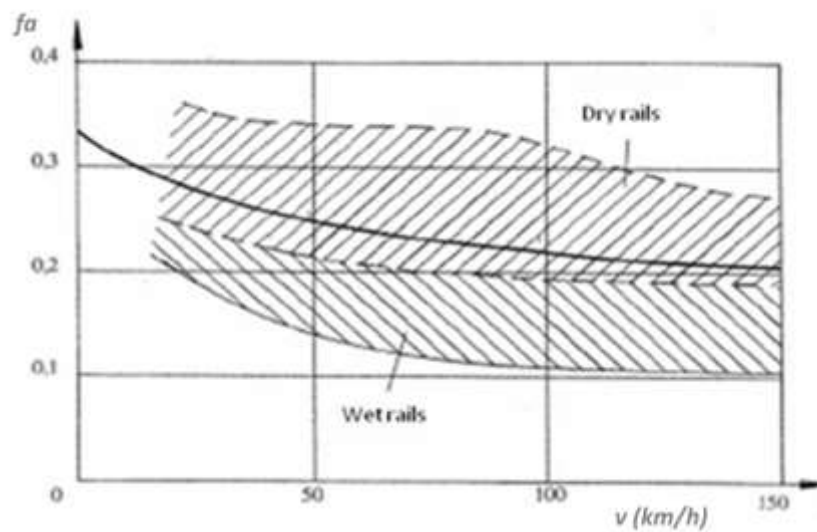
Nel caso ferroviario il coefficiente di aderenza non dipende dalle caratteristiche delle due superfici a contatto (che sono entrambi materiali metallici e quasi perfettamente lisci), ma dal tipo di trazione (motore a scoppio, motore elettrico), dallo stato delle superfici a contatto (presenza di acqua ed impurità) e dalla velocità di rotazione della ruota.

In letteratura si trovano diversi studi volti alla misurazione del coefficiente di aderenza ed alla definizione di modelli di aderenza in funzione della velocità e delle condizioni ambientali.

Ad esempio, la *Curtius* e *Kniffler* (1943) hanno definito un modello che ancora oggi è tra i più utilizzati e che esprime il coefficiente di aderenza in funzione della velocità, per rotaie asciutte e bagnate:

$$f_a = \frac{7.5}{v + 44} + 0.161$$

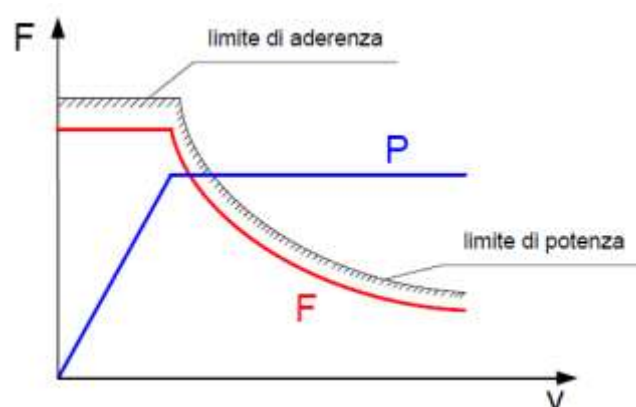
con  $v$  espressa in km/h.



**Figura 2. Modello di aderenza di Curtius e Kniffler (1943)**

A partire dalla Caratteristica Meccanica è possibile definire una curva analoga che lega lo sforzo di trazione  $F$  alla periferia delle ruote motrici alla velocità di avanzamento del veicolo  $v$ ; tale curva è definita *Caratteristica Meccanica di Trazione* (CMT).

Per un apparato motore supposto “ideale” anche la Caratteristica Meccanica di Trazione descritta nel piano V-F è un’iperbole equilatera. Convenzionalmente, nel piano V-F si riporta anche il vincolo relativo all’aderenza rappresentato da una retta orizzontale che taglia l’iperbole equilatera; la curva risultante è l’involuppo dei punti che descrivono il funzionamento del motore:



**Figura 3. Andamento tipico della Caratteristica Meccanica di Trazione di un veicolo**

### 2.2.3 Le resistenze al moto

Le forze che si oppongono al moto sono, invece, chiamate *resistenze*. Convenzionalmente esse vengono classificate in base alla causa che le origina in:

- resistenze accidentali, dovute all'andamento plano-altimetrico del tracciato;
- resistenze ordinarie, dovute alle variazioni di moto uniforme del veicolo.

Le *resistenze ordinarie* consistono nelle forze che si oppongono all'avanzamento del veicolo in moto rettilineo uniforme ed in piano. Esse si distinguono in:

- *resistenza aerodinamica*, dovuta all'attrito per lo scorrimento del veicolo nel mezzo aria;
- *resistenza al rotolamento*, dovuta agli scorrimenti tra ruota e rotaia a causa della loro deformabilità.

Per i convogli ferroviari, le resistenze ordinarie sono determinate sperimentalmente su convogli in marcia; pertanto, non si dispone di espressioni separate per le resistenze aerodinamiche e per le resistenze al rotolamento.

Generalmente, le espressioni hanno forma trinomia e quadratica rispetto alla velocità, con coefficienti che dipendono dalle caratteristiche geometriche del veicolo, dalla velocità relativa tra mezzo e veicolo, dalla densità dell'aria:

$$R_{ordinarie}(v) = r_0 + r_1 \cdot v + r_2 \cdot v^2;$$

Tali coefficienti devono essere valutati per lo specifico materiale rotabile. Tuttavia, esistono delle formule euristiche ricavate da vari studiosi.

In caso di treni passeggeri, la relazione di *Sauthoff* (1932) è tra quelle più comuni:

$$R_W(v) = (1.9 + c_b \cdot v) \cdot \frac{g \cdot m_W}{1000} + 4.7 \cdot (n_W + 2.7) \cdot A_f \cdot \left( \frac{v + 15}{10} \right)^2$$

in cui:

$R_W$  è espressa in [N];

$v$  è la velocità del veicolo ed è espressa in [km/h];

$c_b$  è un coefficiente adimensionale che dipende dal numero di assi del convoglio ed assume i seguenti valori:

- 0.0025 per veicoli con 4 assi;
- 0.004 per veicoli con 3 assi;
- 0.007 per veicoli con 2 assi.

$n_w$  è il numero di carrozze;

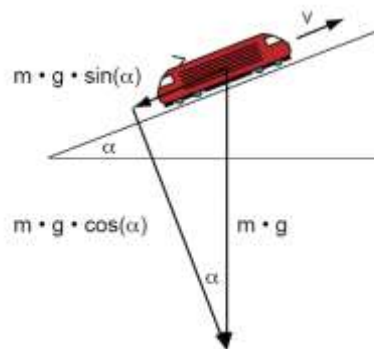
$m_w$  è la massa del veicolo in [kg];

$A_f$  è la superficie maestra del veicolo espressa in [m<sup>2</sup>];

$g$  è l'accelerazione di gravità espressa in [m/s<sup>2</sup>].

Le resistenze accidentali, invece, nascono sui tratti in pendenza e/o curvilinei e/o in galleria.

La resistenza dovuta alla pendenza ( $R_i$ ) nasce è dovuta alla componente parallela alla direzione del moto e di verso opposto della forza peso:



**Figura 4. La resistenza al moto dovuta alla pendenza del tracciato**

Siccome in ambito ferroviario le pendenze assumono valori molto piccoli, è possibile sostituire il seno dell'angolo  $\alpha$  con la sua tangente che è definita *inclinazione* ( $i$ ):

$$R_i = m \cdot g \cdot \tan(\alpha) = m \cdot g \cdot i$$

La resistenza in curva nasce per effetto dello scorrimento trasversale rispetto alla direzione del moto che nasce sui tratti curvilinei a causa del fatto che le ruote sono solidali all'assile ed hanno profilo conico per ottenere raggi interni ed esterni (rispetto al centro della curva) di lunghezze diverse. La resistenza in curva dipende dal raggio di curvatura e dallo scartamento.

Anche in questo caso si trovano diversi modelli sperimentali, come ad esempio il modello di *Roeckl* (2003) valida per binari a scartamento ordinario:

$$R_c = \frac{6.30}{r-55} \cdot m \quad \text{per } r \geq 300 \text{ m}$$

$$R_c = \frac{4.91}{r-30} \cdot m \quad \text{per } r < 300 \text{ m}$$

in cui:

$r$  è il raggio di curvatura [m];

$m$  è la massa del convoglio [kg].

La resistenza in galleria è di natura aerodinamica, ma si differenzia dalla resistenza aerodinamica in senso stretto in quanto nei tratti in galleria l'aria è confinata ed i moti turbolenti sono più diffusi ed accentuati.

In letteratura esistono numerose relazioni sperimentali per questo tipo di resistenza che dipende dalla forma del veicolo, dalla superficie maestra, dal tipo di galleria (canna singola o doppia), dal tipo di rivestimento delle pareti in galleria (con o senza rifiniture). Sostanzialmente, l'espressione della resistenza è del tipo quadratico in funzione della velocità:

$$R_t = f_T \cdot v^2$$

dove  $f_T$  è un coefficiente non adimensionale (kg/m) che varia a seconda delle caratteristiche della galleria e del convoglio.

La forza di inerzia nasce ogni qual volta il convoglio accelera o decelera ed è proporzionale alla massa del convoglio ed al valore di accelerazione. Le forze attive sono in parte sfruttate per realizzare il moto di traslazione longitudinale del veicolo ed in parte per realizzare il moto roto-traslatorio degli elementi del rodiggio (le cd. *masse rotanti*).

Tale dispendio di forza viene considerato incrementando la massa statica del convoglio attraverso un fattore empirico definito *coefficiente delle masse rotanti*. La massa statica moltiplicata per tale coefficiente viene definita *massa dinamica* ed è il valore utilizzato per calcolare la forza di inerzia che nasce ogni qual volta vi sia una variazione di velocità:

$$R_{in} = m \cdot \beta \cdot a = m \cdot \beta \cdot \frac{dv}{dt}$$

Dove:

$m$  è il peso del convoglio (kg);

$a$  è il valore di accelerazione ( $m/s^2$ );

$\beta$  è il *coefficiente delle masse rotanti* (variabile tra 1,6 e 1,1 a seconda del tipo di convoglio).

#### **2.2.4 Lo sforzo frenante**

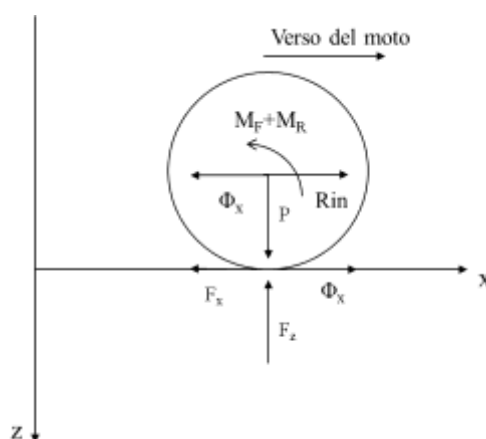
L'arresto o il rallentamento di un veicolo ferroviario consiste sostanzialmente nella trasformazione dell'energia cinetica totale di cui è dotato il veicolo in altra forma di energia. La manovra di

arresto, quindi, prevede la rimozione della coppia motrice applicata agli assi motori del rodiggio e l'applicazione di una coppia frenante a tutti gli assili del veicolo.

In genere, si distinguono due tipologie di frenature in funzione della velocità finale raggiunta (cd. *velocità obiettivo* o *target speed*):

- *frenatura di arresto*, se la velocità obiettivo è pari a zero. Questo tipo di manovra ha lo scopo di arrestare il veicolo applicando tassi di decelerazione nel rispetto della sicurezza della circolazione, del carico trasportato (considerando, dunque, anche il comfort del passeggero), della salvaguardia sia dell'infrastruttura che degli elementi meccanici del veicolo;
- *frenatura di trattenuta*, la velocità obiettivo è inferiore a quella attuata ad inizio manovra, ma non nulla cioè si prevede un semplice rallentamento del veicolo. Tale manovra può essere richiesta sui tratti in discesa per evitare che il veicolo superi la velocità massima consentita sul tratto attraversato.

Lo studio della dinamica cioè delle forze in gioco al contatto ruota-rotaia durante una frenatura viene svolto considerando il classico modello fisico della *ruota frenata*:

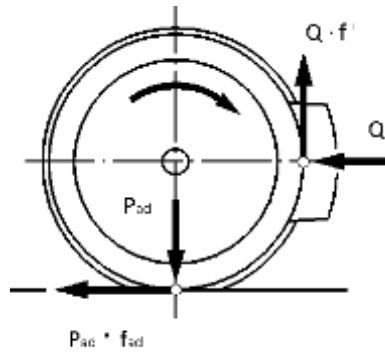


**Figura 5. Schema della ruota frenata**

La coppia frenante  $M_F$  si somma alla coppia resistente  $M_R$  originata da tutte le forze che si oppongono al moto (resistenze ordinarie ed accidentali). Come già anticipato, la coppia frenante viene applicata a tutti gli assili del veicolo, mentre il modo in cui viene applicata tale coppia frenante dipende dalla tipologia del freno installato.

Nel caso più generico, lo schema fisico di riferimento per lo studio delle dinamiche in gioco prevede:

- la forza peso che effettivamente grava sulla singola ruota (cosiddetto *peso aderente*  $P_{ad}$  che si suppone applicata nel baricentro della ruota);
- lo sforzo radiale  $Q$  applicato attraverso l'elemento meccanico preposto del freno (ceppo o tenaglia).



**Figura 6. Freno meccanico: schema delle forze agenti**

Sulla superficie di contatto tra ceppo e cerchione della ruota nasce, quindi, uno sforzo di attrito  $\Phi$  con verso opposto a quello di scorrimento tra cerchione e ceppo e direttamente proporzionale allo sforzo radiale  $Q$  attraverso il coefficiente di attrito  $f'$  (Vicuna, 1993):

$$\Phi = f' \cdot Q \quad (1)$$

Tale sforzo di attrito origina una coppia di verso opposto a quella del moto e di modulo pari al prodotto  $\Phi \cdot r$  con  $r$  raggio della ruota.

Tale momento frenante può essere scomposto in due forze parallele ed applicate rispettivamente al baricentro della ruota ed al punto di contatto ruota-rotaia. La condizione necessaria affinché l'assile non resti bloccato e, quindi, affinché la ruota non strisci sulla rotaia è:

$$\Phi \leq A \Rightarrow f' \cdot Q \leq f_{ad} \cdot P_{ad} \quad (2)$$

Con  $f_{ad}$  coefficiente di aderenza ruota-rotaia ed  $A$  forza di aderenza. Imponendo la condizione limite si ottiene:

$$f' \cdot Q = f_{ad} \cdot P_{ad} \Rightarrow \frac{Q}{P_{ad}} = \frac{f_{ad}}{f'} \Rightarrow Q_{max} = P_{ad} \cdot \frac{f_{ad}}{f'} \quad (3)$$

Tale relazione esprime una dipendenza tra lo sforzo radiale massimo che è possibile applicare, il peso gravante sull'assile ed i valori dei coefficienti di attrito e di aderenza.

Dal momento che sia il coefficiente di attrito ceppo-cerchione che il coefficiente di aderenza ruota-rotaia variano in funzione della velocità di avanzamento, per verificare la condizione di aderenza durante la frenatura (cioè evitare il pattinamento della ruota sulla rotaia con conseguenti usure e deformazioni) è necessario variare il rapporto  $Q/P_{ad}$  al variare della velocità di avanzamento. Inoltre, il coefficiente di attrito nel caso di ceppi in ghisa e cerchi in acciaio mostra un tasso di variazione in funzione della velocità di avanzamento diverso da quello del coefficiente di aderenza. Lo sviluppo dei diversi apparati frenanti nel corso dei secoli è stato indirizzato proprio verso la risoluzione di tali problematiche consentendo di ottimizzare le prestazioni in frenata al fine di ridurre le distanze di arresto e l'usura delle componenti meccaniche degli apparati.

Per garantire la sicurezza di marcia nell'esercizio ferroviario è necessario sempre conoscere con certezza gli spazi necessari ad arrestare il convoglio: le caratteristiche del sistema stesso (guida vincolata, aderenza ridotta) impongono che le segnalazioni di inizio frenatura siano tempestive. Considerando che le velocità massime raggiunte ad oggi raggiungono i 300 km/h, e che tenderanno a crescere, si comprende come uno dei problemi più delicati inerenti la sicurezza di marcia sia proprio quello della frenatura. Lo spazio ed il tempo di arresto dipendono sia dalle condizioni del tracciato che dal materiale rotabile.

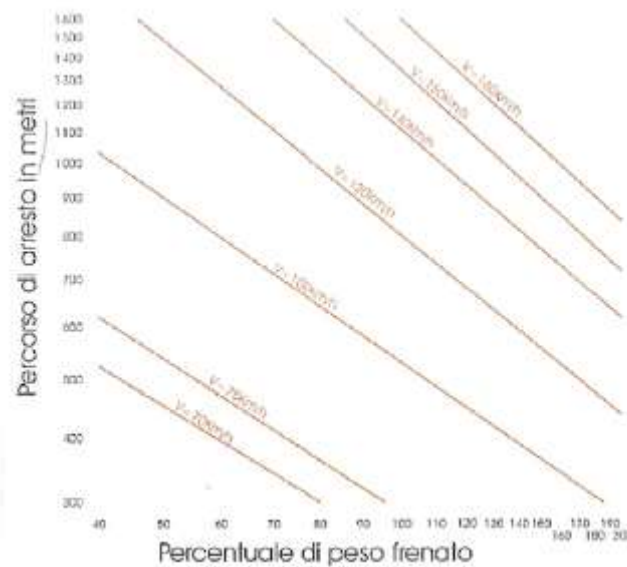
Per assegnare una velocità massima di regime ad un certo tipo di convoglio è necessario, quindi, conoscere quale sia la sua capacità frenante al fine di verificare che, se lanciato alla velocità massima, esso sia in grado di arrestarsi nello spazio e nel tempo prefissati. Tale capacità frenante dipende da quella del singolo veicolo che compone il convoglio e questa, a sua volta, dipende da svariati fattori relativi sia alle caratteristiche costruttive del veicolo stesso che alla velocità ed alle condizioni dinamiche nell'area di contatto tra ruota e rotaia.

Pertanto, è necessario definire dei criteri oggettivi che consentano di giudicare l'efficacia frenante di un dato veicolo.

La capacità o efficacia frenante di un veicolo ad un determinato regime di frenatura (esercizio o emergenza) è descritta dal cosiddetto *peso frenato*. Esso rappresenta la capacità di un veicolo di arrestarsi entro uno spazio prefissato (percorso di arresto) se lanciato ad una velocità prestabilita e in regime di frenatura di emergenza cioè rapida. Pertanto, il peso frenato è una caratteristica costruttiva del veicolo.

L'*International Union of Railways* (U.I.C.) ha definito delle norme che stabiliscono le modalità di esecuzione delle prove per determinare il peso frenato, relazioni sperimentali ed abachi che correlano spazio di arresto, velocità di inizio frenatura e percentuale di peso frenato. Gli abachi, sempre di origine sperimentale, sono del tipo come quello riportato nella seguente figura:





**Figura 7. Abaco per la determinazione del peso frenato di un veicolo ferroviario**

La *percentuale di peso frenato*  $\lambda$  è definita come il rapporto tra il peso frenato del veicolo ed il suo peso totale:

$$\lambda = \frac{P_{frenato}}{P_{tot}} \quad [\%]$$

La percentuale di massa frenata di un convoglio è ottenuta come il rapporto tra la somma delle percentuali di massa frenata di ciascuna carrozza (determinata secondo la UIC Leaflet 544-1) e la massa totale del convoglio.

Le prestazioni in frenata di un veicolo determinate in questo modo derivano da puri artifici matematici e non hanno alcun significato fisico. Infatti, il modello UIC che ricava la decelerazione a partire dalla percentuale di massa frenata è stato definito e validato attraverso il confronto con distanze di arresto misurate nel corso di un'intensa campagna di prove in capo svolte dall'UIC con l'impiego di una larga varietà di materiali rotabili. Il risultato di questa campagna di sperimentazioni ha prodotto gli abachi di riferimento e le relative espressioni sperimentali riportate nella norma UIC su menzionata.

Ad esempio, per determinare la percentuale di peso frenato è necessario effettuare delle prove in campo per misurare lo spazio di arresto imponendo una certa velocità di inizio frenatura. Ottenuto lo spazio di arresto, utilizzando gli abachi UIC si ricava la percentuale di peso frenato. Ciascuna prova svolta sarà caratterizzata anche dal numero di carrozze con freni efficienti (tutte o una parte).

#### 2.2.4.1 Tipologie di freni su rotabili ferroviari

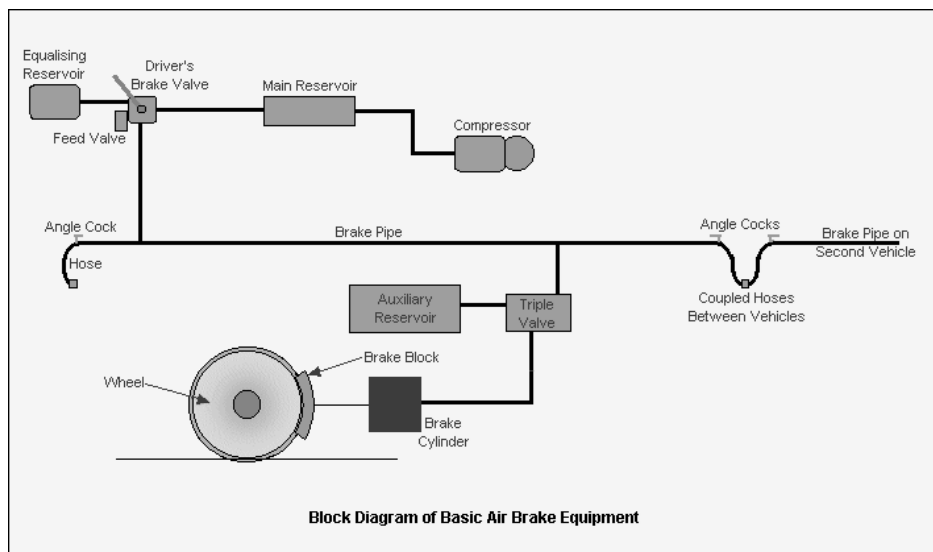
La classificazione delle tipologie di freni adottate sui rotabili ferroviari più diffusa è quella che assume come criterio di classificazione il principio fisico grazie al quale viene dissipata l'energia cinetica della ruota. In base ad esso, si distinguono:

- freno meccanico ad aria o pneumatico (*pneumatic brake*) che può essere:
  - o a ceppi;
  - o a dischi.
- freno elettrodinamico (*elettropneumatic brake*) che può essere:
  - o a recupero;
  - o reostatico;
- freno elettromagnetico (*magnetic brake*) che può essere:
  - o a pattini magnetici (*magnetic track brake*);
  - o a correnti di Foucauld (*eddy current brake*).

#### **Freno pneumatico**

Un freno meccanico o pneumatico prevede che l'energia cinetica di cui è dotato il veicolo sia trasformata in calore. L'energia cinetica è dissipata per attrito tra l'elemento rotante (la ruota) ed un corpo rigido premuto contro l'elemento rotante (ad esempio il ceppo).

La maggior parte dei rotabili esistenti al mondo dotati di un freno meccanico utilizzano aria compressa per generare la forza che comprime il corpo fisso sulla ruota. L'aria compressa è trasmessa lungo il convoglio attraverso una condotta principale: ogni variazione della pressione nella condotta provoca un cambiamento di stato dei freni installati su ciascun veicolo formante il convoglio. La pressione dell'aria è correlata alla forza di compressione del corpo rigido sulla ruota ciò significa che è possibile applicare lo sforzo frenante, annullarlo del tutto o in parte. La seguente figura mostra le principali componenti di un freno pneumatico:



**Figura 8. Schema a blocchi con le principali componenti del freno pneumatico**

Il *compressore* (Compressor) è una pompa che preleva aria dall'atmosfera e la comprime, il *serbatoio principale* (Main Reservoir) immagazzina l'aria compressa e la rende disponibile all'occorrenza (l'aria compressa viene utilizzata anche per altri impianti di servizio a bordo veicolo oltre che per i freni).

La *condotta principale* (Brake Pipe) attraversa l'intero convoglio e consente di trasmettere le variazioni di pressione necessarie per controllare la frenatura su ciascun veicolo formate il convoglio. La condotta di una carrozza è collegata a quella della successiva mediante dei raccordi flessibili che possono essere sganciati nel caso in cui le carrozze debbano essere disaccoppiate. Il sistema ad aria nel freno pneumatico lo rende un freno sicuro (o detto anche "fail-safe"); infatti, variazioni di pressione nella condotta principale (volontariamente provocate o accidentali) provocano automaticamente la frenatura in quanto l'apparato frenante è in grado di rilevare il gradiente di pressione. Variazioni di pressione nella condotta principale possono essere dovute a svariate cause come ad esempio:

- Riduzione più o meno rapida controllata dal macchinista per attuare la frenatura di servizio o di emergenza;
- Riduzione rapida azionata dal conduttore (personale di bordo) o da un passeggero su una carrozza in caso di emergenza (attraverso una valvola specifica a bordo);
- Riduzione a causa di rottura della condotta o dei raccordi (per urto o combustione);
- Riduzione in caso di deragliamento di una o più carrozze.

Le condotte principali delle carrozze sono raccordate attraverso i cosiddetti *tubi di accoppiamento* (coupled hoses) che consentono di variare la composizione del convoglio senza causare danni

all'apparato frenante. I tubi di accoppiamento terminano con un *coperchio di chiusura* (in figura: parte terminale in verde del tubo di accoppiamento).

La condotta principale di ciascuna carrozza termina con un *dispositivo di isolamento* (angle cock) che consente di isolare la specifica condotta dalle altre attigue.

Il macchinista gestisce il freno attraverso una *leva* (Driver's Brake Valve) che può assumere le diverse posizioni (descritte in seguito) a seconda dell'operazione richiesta (frenatura di servizio, di emergenza, sfrenatura, ecc.).

Il *serbatoio equilibrante* (equalising reservoir) fornisce aria aggiuntiva a richiesta del macchinista per raggiungere il valore adeguato di pressione nella condotta principale in caso di frenatura di servizio: quando è comandata una frenatura di servizio il posizionamento della leva freno su "servizio" non comporta direttamente lo scarico della condotta principale, ma mette in comunicazione il serbatoio equilibrante con la condotta principale. Tale serbatoio, attraverso una specifica valvola (non rappresentata in figura), rileva la differenza di pressione tra l'aria in esso stoccata e quella dell'aria nella condotta ed automaticamente consente la fuoriuscita di aria dalla condotta principale fino a quando la pressione in essa è uguale a quella dell'aria al suo interno. La funzione del serbatoio equilibrante è quella di evitare i problemi che possono insorgere in caso di condotte principali molto lunghe e frenate di modesta entità: infatti, piccole variazioni di pressione richieste dal macchinista per lievi frenate non verrebbero rilevate fino a quando la variazione di pressione non si sia stabilizzata lungo l'intero convoglio. Il serbatoio equilibrante, allora, fa in modo che il macchinista possa regolare adeguatamente la pressione nella condotta principale in quanto è in grado di leggere quasi istantaneamente il valore di pressione raggiunto senza dover attendere che il valore di pressione richiesto si sia stabilizzato lungo l'intera condotta principale.

Su ogni carrozza è sempre presente almeno un *cilindro freno* (brake cylinder): al suo interno è presente un pistone il cui movimento è regolato dall'aria in pressione proveniente dalla condotta principale.

Il pistone genera la forza di serraggio tra i ceppi (o le pastiglie) e le ruote (o di dischi freno) attraverso un'*asta freno* o un sistema di leve detto *leveraggio*; in genere tutti gli elementi che sono collegati al pistone del cilindro freno e grazie ai quali si realizza il serraggio del ceppo (o delle pinze) sulla ruota sono definiti *organi di serraggio* (brake rigging). Essi possono essere un sistema di leve e pinze o semplicemente un'asta collegata al pistone del cilindro freno. Nei freni a dischi moderni impiegati sui convogli passeggeri per ciascun disco freno sono previste due pastiglie compresse sul disco attraverso una pinza. Quindi, un unico cilindro freno può azionare in parallelo più organi di serraggio (più pinze freno) a seconda del numero di dischi freno presenti sull'assile della sala montata (fino ad un massimo di 16).

Al fine di garantire sempre una riserva di aria disponibile per realizzare la frenatura, ogni pistone del cilindro freno è collegato ad un *serbatoio ausiliario* (auxiliary reservoir): il flusso di aria in ingresso ed in uscita dal serbatoio ausiliario è controllato attraverso una *valvola tripla* (triple valve) che nei sistemi moderni è stata sostituita da un *distributore* che consente di realizzare la frenatura a più stadi di pressione.

Il *ceppo* (brake block) è il corpo rigido che viene pressato contro la superficie della ruota grazie al pistone del cilindro freno. In genere sono di ghisa o di materiale sintetico (per i freni più moderni) e sono gli elementi più soggetti ad usura dell'apparato frenante e, quindi, quelli che necessitano di controlli regolari e molto frequenti per provvedere eventualmente alla loro sostituzione. Gli apparati frenanti più moderni utilizzano i freni a dischi ed in tal caso la funzione dei ceppi è svolta dalle pastiglie freni (che sono compresse sui dischi freno dalle tenaglie o pinze freno) e che vanno regolarmente sostituite perché usurate.

#### Posizioni della leva freno.

Come precedentemente anticipato, il macchinista gestisce il freno attraverso una *leva* (Driver's Brake Valve) che può assumere diverse posizioni. Le posizioni operative di base sono:

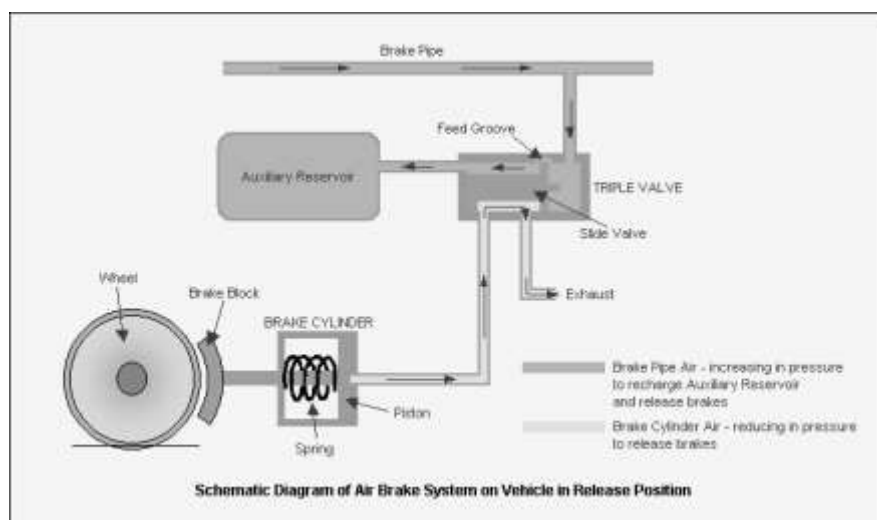
- Rilascio (*Release*) o sfrenatura;
- Servizio (*Application*);
- Tenuta (*Lap*);
- Emergenza (*Emergency*);
- Operativo (*Running*).

#### *Posizione leva freno "Rilascio" (Release) o sfrenatura.*

Se il macchinista ha posizionato la leva del freno su "Rilascio" significa che è appena avvenuta una frenatura ed i freni devono essere ripristinati all'uso. La posizione "Rilascio" prevede che il serbatoio principale di alimentazione sia collegato alla condotta principale: in questo modo la pressione dell'aria nella condotta aumenta rapidamente in modo da essere pronta nel caso in cui il macchinista comandi una frenatura. L'aria della condotta principale passa attraverso la valvola tripla presente su ogni carrozza del veicolo premendo la valvola oscillante (slide valve) presente all'interno della valvola tripla verso sinistra. Il movimento della valvola oscillante consente sia il passaggio di aria al di sopra di essa dalla condotta principale verso il serbatoio ausiliario che il passaggio di aria dal cilindro freno verso uno sfiato di troppo pieno (exhaust port).

Il serbatoio ausiliario è alimentato con aria fin quando la pressione al suo interno non ha raggiunto quella della condotta principale. Contemporaneamente l'apertura al di sotto della valvola oscillante consente lo sfogo di aria del cilindro freno verso l'atmosfera attraverso lo sfiato: non appena l'aria

fuoriesce in atmosfera la molla del cilindro richiama indietro il pistone del cilindro provocando lo stacco del ceppo dalla ruota. In questo modo ciascun freno è rilasciato (i ceppi sono disserrati), il serbatoio ausiliario è stato ricaricato e tutto è pronto per una nuova frenatura.

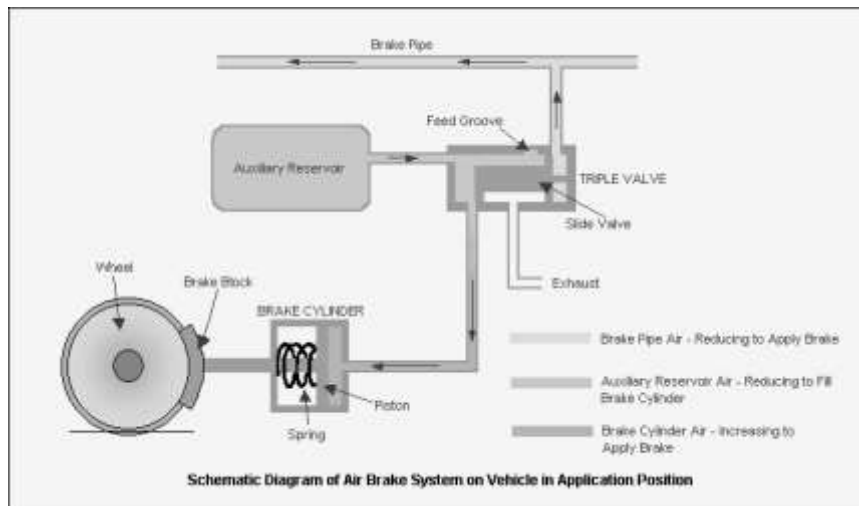


**Figura 9. Schema di funzionamento del freno pneumatico con leva in posizione “Carica”**

*Posizione leva freno “Servizio” (Application).*

Quando la leva freno è posizionata su “Servizio” viene chiuso il collegamento con il serbatoio principale e la condotta principale è messa in comunicazione con l’atmosfera: per equilibrarsi con la pressione atmosferica l’aria nella condotta principale si espande generando la forza di compressione dei ceppi sulle ruote.

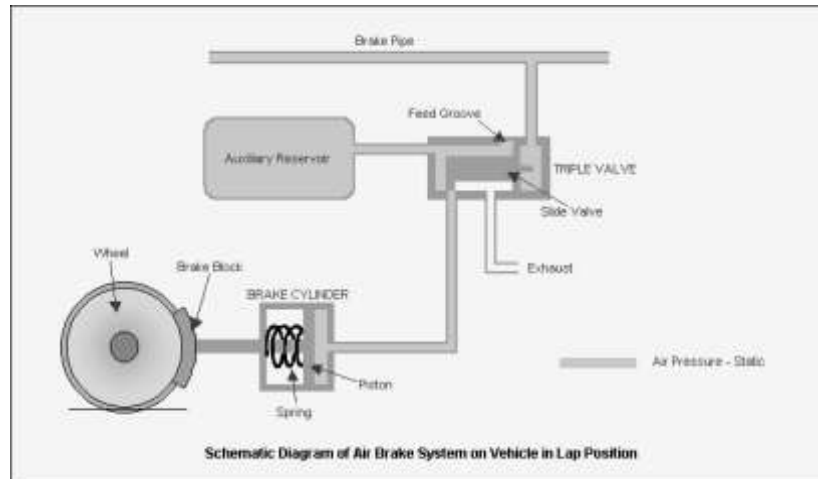
La diminuzione di pressione nella condotta principale è rilevata dalla valvola oscillante: dal momento che da un lato della valvola la pressione sta diminuendo, l’aria in pressione del serbatoio ausiliario dall’altro lato spinge la valvola oscillante verso destra chiudendo l’alimentazione in comunicazione con la condotta principale (feed groove). Contemporaneamente anche il collegamento tra il cilindro freno e lo sfiato di troppo pieno è stato chiuso e, quindi, l’aria in pressione proveniente dal serbatoio ausiliario non può che andare ad alimentare il cilindro freno pressando il pistone e caricando la molla. Il pistone scorre all’interno del cilindro verso sinistra provocando il serraggio del ceppo sulla ruota. L’aria continua a defluire dal serbatoio ausiliario al cilindro freno fin quando non si è azzerata la differenza di pressione: la pressione massima raggiunta nel cilindro freno (cioè la posizione del pistone di massimo serraggio) equivale ad una piena applicazione del freno (la cosiddetta *full application*) cioè al serraggio massimo. Per ottenere una piena applicazione con un volume di aria ragionevole, generalmente il volume del cilindro freno è circa il 40% di quello del serbatoio ausiliario.



**Figura 10. Schema di funzionamento del freno pneumatico con leva in posizione “Servizio”**

*Posizione leva freno “Tenuta” (Lap).*

La posizione “Tenuta” è utilizzata per mantenere in atto una frenatura parziale (cioè non pienamente sviluppata con pistone a fine corsa); il macchinista può utilizzare questa posizione per interrompere l’afflusso di aria dal serbatoio ausiliario al cilindro freno quindi dopo che è stata iniziata un’ operazione di frenatura di servizio. Ciò viene fatto chiudendo il collegamento tra la condotta principale e l’atmosfera in modo che l’aria non si espanda per raggiungere la pressione atmosferica. In ciascuna valvola tripla questa sospensione di depressione è intercettata dalla valvola oscillante in quanto la pressione nel serbatoio ausiliare (dal lato sinistro) continua a diminuire mentre la diminuzione della pressione nella condotta principale cessa. Questo provoca lo spostamento della valvola oscillante verso sinistra fino a quando non è chiusa la connessione con il cilindro freno. La posizione raggiunta dalla valvola oscillante è a metà strada tra la posizione di “Servizio” e quella di “Rilascio” e la pressione del serbatoio ausiliario eguaglia quella della condotta principale. La pressione nel cilindro freno è mantenuta costante perché non in comunicazione né con il serbatoio né con la condotta principale né con lo sfiato di troppo pieno.



**Figura 11. Schema di funzionamento del freno pneumatico con leva in posizione “Tenuta”**

L’operazione di “Tenuta” non può essere svolta se è già stata iniziata un’operazione di “Rilascio”. Una volta che la leva freno è stata posizionata su “Rilascio” tutte le valvole oscillanti sono mosse in modo da consentire la ricarica dei serbatoi ausiliari. Una frenatura di servizio successiva non può avere luogo fin quando i serbatoi non sono stati completamente ricaricati; il tempo necessario alla ricarica serbatoi dipende dalla quantità di aria utilizzata dalla precedente frenatura e dalla lunghezza del convoglio.

*Posizione leva freno “Emergenza” (Emergency).*

Molti tipi di freni penumatici possono prevedere anche la posizione “Emergenza” che consente di attuare una frenatura più rapida di quella di servizio. Infatti, se la leva freno è messa in questa posizione l’aria nella condotta principale è scaricata in atmosfera più rapidamente in quanto l’apertura di sfiato è più larga. La quantità di aria che è possibile insufflare nel cilindro freno non varia rispetto alla frenatura di servizio, quello che varia è il tasso di applicazione della forza di serraggio che nella frenatura di emergenza è più rapido.

*Posizione leva freno “Operativo” (Running).*

La posizione “operativo” regola la valvola di alimentazione (feed valve) che consente di mantenere la pressione dell’aria nella condotta principale costante cioè di contrastare eventuali piccole perdite o sfiati lungo la condotta.

Per assicurare che la pressione nella condotta principale rimanga costante, quando la leva freno è nella posizione “operativo”, la valvola di alimentazione ne garantisce il collegamento con il serbatoio principale. Tale valvola è tarata su una specifica pressione operativa variabile da sistema a sistema, ma in genere compresa tra i 4.5 ed i 6.2 bar.

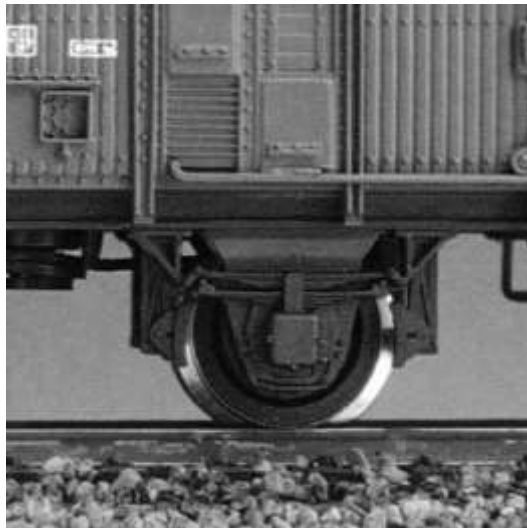


Le tipologie di freni pneumatici sono due:

- a ceppi;
- a dischi.

Freno a ceppi.

Questa tipologia di freno genera la coppia frenante serrando i ceppi direttamente sulla superficie di rotolamento della ruota. I ceppi possono essere realizzati in ghisa o in altro materiale agglomerato (ghisa grigia, ghisa sferoidale, alluminio, acciaio). Nel caso di ceppi in ghisa e di cerchioni in acciaio, il coefficiente di attrito ceppo-ruota decresce all'aumentare della velocità più rapidamente del coefficiente di aderenza ruota-rotaia, soprattutto per velocità inferiori ai 50 km/h.



**Figura 12. Freno a ceppi**

Dal momento che al giorno d'oggi le velocità di marcia si attestano almeno sui 100 – 120 km/h è necessario applicare elevati valori degli sforzi frenanti sin dai primi stadi della frenatura. Tuttavia, si verifica che nonostante per velocità superiori agli 80 km/h il rapporto  $f_{ad}/f'$  con materiali usuali (acciaio-ghisa) consenta di applicare uno sforzo radiale  $Q$  elevato anche nel rispetto del limite dell'aderenza, il rapporto  $Q/P_{ad}$  risulta eccessivo per le basse velocità cioè si provoca il blocco delle ruote e lo strisciamento. Pertanto, nella frenatura a ceppi è sempre previsto un dispositivo di correzione dello sforzo radiale che applica due stadi di pressione diversi sui ceppi e che interviene automaticamente per variare il rapporto  $Q/P_{ad}$  in corrispondenza di determinati valori di velocità o in funzione del carico gravante sull'assile (quest'ultimo usato nei dispositivi moderni) cioè il cosiddetto dispositivo *a doppio stadio di frenatura* (Vicuna, 1993).

Il freno meccanico a ceppi, tuttavia, presenta alcuni vantaggi che ne giustificano l'utilizzo ancora ai giorni nostri:

- peso dell'apparato ridotto;
- masse non sospese e masse rotanti ridotte (con conseguente diminuzione della resistenza al rotolamento e di inerzia) grazie al fatto che utilizza un organo del rodiggio stesso cioè la ruota;
- il ceppo “pulisce” il cerchione della ruota da eventuali materiali depositati sulla superficie (acqua, foglie secche, fango, ecc.) migliorando le prestazioni in frenata in condizione di rotaie bagnate.

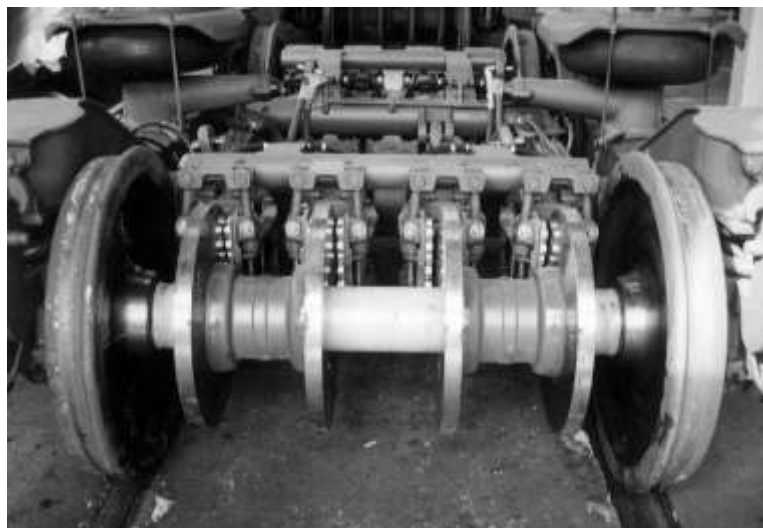
Tuttavia, i principali svantaggi sono così sintetizzabili:

- il coefficiente di attrito ceppo-cerchione è fortemente variabile con la velocità e si può incorrere nel rischio di pattinamento della ruota a basse velocità di avanzamento con conseguenti deformazioni della stessa;
- essendo necessario prevedere sempre dispositivi a doppio stadio di frenatura per garantire prestazioni adeguate sia ad alta che bassa velocità l'ipotesi di decelerazione costante in fase di arresto è men che mai plausibile;
- il generarsi di scorrimenti relativi tra ceppi e ruote (in regime di attrito) provoca un riscaldamento delle ruote che ne favorisce l'usura e la deformazione;
- è un tipo di freno che dipende strettamente dal fenomeno dell'aderenza.

A causa di questi aspetti negativi, ad oggi il freno a ceppi sui treni passeggeri non è più utilizzato se non che sulle locomotive.

## Freno a dischi

Nel freno a dischi sono predisposte delle pinze (o ganasce) quali elementi frenanti che agiscono su dischi freno metallici montati direttamente sull'assile e, quindi, solidali con le ruote del veicolo. Sulle pinze sono applicate delle guarnizioni (cd. pastiglie) realizzate in materiale sintetico che consentono di realizzare coefficienti di attrito quasi costanti rispetto alla velocità di scorrimento. Inoltre, il coefficiente di attrito raggiunge valori più elevati di quelli del freno a ceppi in ghisa e consente, quindi, di generare lo stesso sforzo frenante a parità di sforzo radiale esercitato per serrare le tenaglie.



**Figura 13. Freno a dischi**

Garantendo prestazioni migliori, quindi, il freno a dischi consente anche l'arresto in distanze minori. Inoltre:

- è più silenzioso del freno a ceppi;
- garantisce maggior comfort in frenata in quanto non vi sono scosse e la decelerazione è graduale;
- ha la capacità di assorbire grandi energie cinetiche ed è quindi utilizzabile anche sui convogli AV (grazie alla massa e al sistema di raffreddamento).

Nonostante la ricerca e l'innovazione abbiano apportato dei miglioramenti sostanziali negli ultimi anni, il freno meccanico a dischi presenta ancora dei difetti, quali:

- presenza di un maggior numero di masse non sospese (dischi metallici) rispetto al freno a ceppi;
- la frenatura è ancora dipendente dall'aderenza disponibile.

La forza frenante generata da un freno pneumatico è generalmente descritta da una curva caratteristica con andamento del tipo come quello riportato in figura (UNI, 2003):

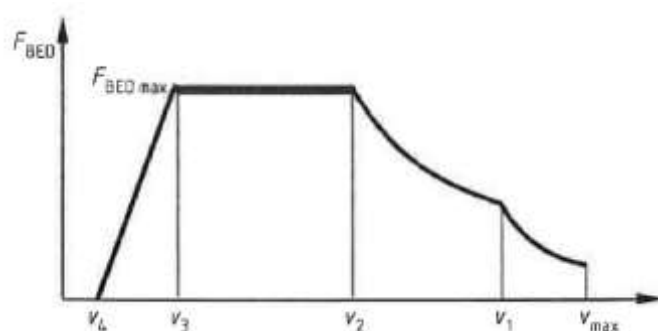
### **Freno elettrodinamico**

In un freno elettrodinamico (o rigenerativo) gli assi motori diventano l'organo frenante cioè dissipano l'energia cinetica dipendente dalla velocità di rotazione in quanto i motori di trazione della locomotiva vengono utilizzati come generatori: essi sono isolati dalla linea di alimentazione e formano un circuito con resistenze che dissipano in calore la potenza generata dagli assi motori.

Con tale tipologia di freno si realizza la cosiddetta “frenatura elettrica” (distinta dalla “frenatura meccanica” che agisce per effetto della forza di attrito): l’azione elettro-dinamica garantisce un valore efficiente di decelerazione imposta al veicolo solo fino a velocità di 30 km/h al di sotto delle quali occorre necessariamente applicare una frenatura di tipo meccanico.

Per le caratteristiche di funzionamento, il freno elettrodinamico è attivo solo sugli assi motori del veicolo e se da un lato consente di evitare gli effetti negativi della frenatura per attrito cioè meccanica (usura e deformazioni), dall’altro risulta inutilizzabile in caso di avaria del motore.

La forza frenante generata da un freno elettrodinamico è generalmente descritta da una curva caratteristica con andamento del tipo come quello riportato in figura (UNI, 2003) :



**Figura 14. Curva caratteristica freno elettrodinamico (UNI EN 14531-1)**

in cui il tratto relativo ai valori caratteristici di velocità  $V_1$  e  $V_2$  è quello di funzionamento del motore/generatore a potenza costante, mentre il tratto tra  $V_2$  e  $V_3$  è quello in cui la forza frenante ha raggiunto il suo valore massimo e lo mantiene costante.

### **Freno elettromagnetico**

Questo tipo di freno è utilizzato solo nel caso di frenatura di emergenza. Ad oggi non è consentito sulle linee gestite da Rete Ferroviaria Italiana (RFI), mentre è molto diffuso sulla maggior parte dei rotabili in circolazione sulle linee europee.

Il freno elettromagnetico può essere di due tipi:

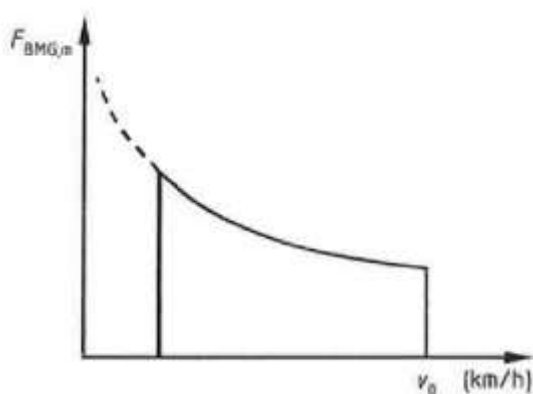
- a pattini;
- a correnti di Foucauld.

#### Freno a pattini

Il freno elettromagnetico a pattini prevede che i pattini installati sul rotabile siano compressi sulle rotaie grazie ad una forza attrattiva indotta. In questo caso, dunque, la frenatura è di tipo meccanico cioè sfrutta l'attrito tra le due superfici a contatto (pattino – rotaia) e la forza frenante è direttamente proporzionale alla forza di attrazione tra i due corpi che viene opportunamente generata e modulata. Tale forza di attrazione è diretta ortogonalmente rispetto alle rotaie ed è generata da un elettromagnete che viene alimentato dalla batteria del veicolo in caso di richiesta di frenatura.

Il freno a pattini consente di applicare sforzi frenanti di gran lunga superiori rispetto al freno meccanico in quanto la forza di compressione tra pattino e rotaia può raggiungere valori anche superiori alla forza peso cui è soggetto il veicolo stesso e, quindi, di sfruttare una forza di aderenza maggiore senza rischiare il blocco delle ruote. Pertanto, è una tipologia di freno che non è condizionata dal fenomeno dell'aderenza. Di contro, tuttavia, il coefficiente di attrito pattino-rotaia è variabile con la velocità e genera elevate decelerazioni anche alle basse velocità per cui la frenata elettromagnetica è automaticamente disabilitata dall'apparato frenante per velocità di avanzamento inferiori ai 20 km/h. Inoltre, per garantire l'effetto della forza di attrazione trasmessa tra pattino e rotaia è necessario un armamento adatto; le rotaie subiscono una notevole usura motivo per il quale tale tipo di frenatura è inibita anche alle alte velocità (cioè maggiori di 120 km/h). Naturalmente, la presenza dei pattini sul veicolo ne incrementa il peso in modo non trascurabile dal punto di vista delle resistenze al moto.

L'andamento tipico della forza frenante in caso di frenatura elettromagnetica con pattini è come quello riportato in figura (UNI, 2003):



**Figura 15. Curva caratteristica freno a pattini (UNI EN 14531-1)**

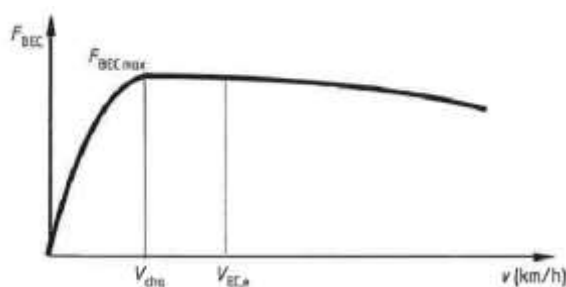
In particolare, la forza frenante magnetica media ( $F_{BMG,m}$ ) è direttamente proporzionale alla forza di attrazione magnetica (costante in valore) attraverso il coefficiente di attrito medio tra pattino e rotaia.

### Freno a correnti di Foucauld

Il freno elettromagnetico a correnti di Foucauld (o a correnti parassite cioè le cosiddette “eddy current”) prevede, invece, che non vi sia contatto tra pattino e rotaia. Grazie all’induzione magnetica il pattino induce nella rotaia delle correnti parassite che, a loro volta, generano un campo magnetico opposto la cui risultante è una forza che genera una coppia di verso opposto a quella del moto della ruota. Pertanto, siccome l’azione frenante non è svolta per meccanismi di attrito non si provoca usura delle ruote e delle rotaie. Inoltre, l’aderenza non influenza lo sforzo frenante massimo applicabile ed è possibile utilizzare tale tipo di freno anche ad alte velocità.

Di contro, per l’applicazione della forza frenante sulla rotaia è necessario un armamento adatto ed il peso complessivo del veicolo risulta fortemente gravato dalla presenza del freno.

La curva caratteristica della forza frenante in funzione della velocità ha un andamento del tipo (UNI, 2003):



**Figura 16. Curva caratteristica freno a correnti di Foucauld (UNI EN 14531-1)**

dove  $F_{BEC}$  è la forza frenante istantanea,  $V_{cha}$  è la velocità alla quale le correnti parassite sono massime,  $V_{EC,e}$  è la velocità finale che individua il valore di riferimento di forza frenante.

#### **2.2.4.2 Tipologie di controllo del freno**

Convenzionalmente si definiscono “freni ordinari” il freno pneumatico ed elettropneumatico che sono anche gli unici freni considerati sicuri nel senso che ai fini del calcolo delle distanze di arresto la decelerazione minima garantita deve essere sempre quella fornita solo dal freno ordinario. Gli altri tipi di freno (elettrodinamico, elettromagnetico, ecc) sono definiti “freni speciali” ed il loro contributo va a sommarsi eventualmente a quello dei freni ordinari.

Un freno è definito *sicuro* se dotato delle seguenti proprietà (UIC 544-1):

- automaticità: ogni interruzione della condotta principale pneumatica (per guasti endogeni o esogeni) deve far scattare l'arresto immediato.
- contiguità: l'azione frenante deve essere applicata simultaneamente su tutte le carrozze ed il comando deve essere fornito da un'unica postazione. Infatti, la condotta pneumatica principale attraversa tutte le carrozze al fine di fornire quanto più simultaneamente il comando di frenatura. Per tale motivo sui treni passeggeri si utilizzano freni elettropneumatici: lo sforzo frenante è sempre regolato da aria in pressione mentre i comandi di frenatura sono forniti mediante dispositivi elettrici al fine di aumentare la rapidità;
- graduabilità: lo sforzo frenante applicato deve poter essere regolato per adattarsi alle varie fasi della manovra di arresto;
- inesauribilità: l'apparato frenante deve essere sempre efficiente anche dopo numerosi cicli di carico e scarico. Infatti, lo sforzo frenante garantito per un sistema frenante efficiente non deve mai essere inferiore al 90 - 85 % di quello massimo.

### 2.3 Il modello cinematico teorico

Supponendo il veicolo isolato, cioè che non interferisce con le altre componenti del flusso, è possibile calcolare in modo esplicito i valori delle caratteristiche cinematiche se sono note quelle relative alla tratta di percorrenza (andamento plano-altimetrico, velocità massime operative).

Le caratteristiche cinematiche che descrivono il moto del veicolo isolato, considerato come puntiforme, sono: il tempo di percorrenza ( $t$ ), lo spazio percorso ( $s$ ), la velocità ( $v$ ), l'accelerazione ( $a$ ) ed il contraccollo ( $j$ ).

Naturalmente, le grandezze cinematiche sono tra loro correlate:

$$a = \int j \cdot dt; \quad v = \int a \cdot dt; \quad s = \int v \cdot dt$$

In particolare, il calcolo esplicito di tali grandezze si basa sulle seguenti ipotesi semplificative:

- veicolo isolato. La marcia del veicolo non è influenzata dalla presenza degli altri veicoli cioè ogni veicolo può viaggiare alla velocità desiderata.
- marcia a guida vincolata. Non è previsto il cambio di corsia (sorpasso), né il cambio di direzione (inversione di marcia).
- condotta di guida preordinata. Il veicolo viaggia seguendo profili di accelerazione prestabiliti.

Assunte tali ipotesi, considerando una tratta elementare, cioè un tronco di via compreso tra due successive fermate programmate, il moto di un veicolo è scomposto in fasi in cui la velocità può

essere descritta da una funzione continua del tempo e dello spazio. Le fasi caratteristiche del moto sono:

- fase di avviamento;
- fase di regime;
- fase di marcia inerziale;
- fase di frenatura.

### **2.3.1 Fase di avviamento**

Nella fase di avviamento la velocità aumenta con continuità dal valore nullo ad un valore massimo finale.

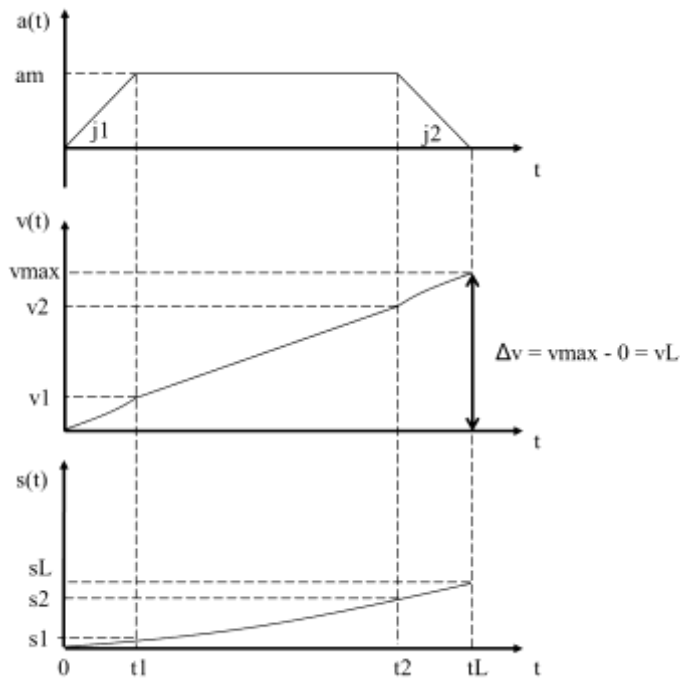
Nei sistemi di trasporto di massa per norma deve essere sempre garantito il comfort di marcia nelle fasi di moto vario (avviamento, marcia inerziale e frenatura) e ciò si ottiene imponendo che vi siano variazioni di accelerazione nel tempo (e quindi di velocità) contenute entro limiti stabiliti.

A causa della scarsa aderenza presente nell'area di contatto ruota-rotaia nella fase di avviamento è possibile applicare modeste variazioni di accelerazione; tipicamente i valori di accelerazione variano tra 0,1 e 1,0 m/s<sup>2</sup> (Coline, 2006).

Vi sono diversi standards a livello mondiale che specificano limiti massimi di accelerazione longitudinale per garantire il comfort di marcia; tali valori derivano da analisi sull'impatto delle vibrazioni sul corpo umano che esulano dalla presente trattazione.

Dunque, assumendo che la potenza del motore sia in grado di fornire sempre uno sforzo di trazione adeguato (indipendentemente dalle resistenze), nella fase di avviamento i profili delle grandezze cinematiche rispetto al tempo hanno il seguente andamento:





**Figura 17. Diagramma di marcia: fase di avviamento**

in cui:

$a_m$  è l'accelerazione massima;

$j_1$  è il contraccolpo iniziale;

$j_2$  è il contraccolpo finale.

Le funzioni del tempo delle grandezze cinematiche risultano quindi:

- per  $0 \leq t \leq t_1$  :
  - $j(t) = j_1$ ;
  - $a(t) = j_1 \cdot t \Rightarrow a(t_1) = a_m$  ;
  - $v(t) = \int_0^t a(t) \cdot dt = \int_0^t j_1 \cdot t \cdot dt = \frac{1}{2} \cdot j_1 \cdot t^2 \Rightarrow v(t_1) = \frac{1}{2} \cdot \frac{a_m^2}{j_1}$  ;
  - $s(t) = \int_0^t v(t) \cdot dt = \int_0^t \frac{1}{2} \cdot j_1 \cdot t^2 \cdot dt = \frac{1}{6} \cdot j_1 \cdot t^3 \Rightarrow s(t_1) = \frac{1}{6} \cdot j_1 \cdot t_1^3 = \frac{1}{2} \cdot \frac{a_m^2}{j_1^2}$
- per  $t_1 < t \leq t_2$ 
  - $j(t) = 0$ ;
  - $a(t) = a_m$  ;
  - $v(t) = v_1 + \int_{t_1}^t a(t) \cdot dt = v_1 + a_m \cdot (t - t_1) \Rightarrow v(t_2) = v_1 + a_m \cdot (t_2 - t_1)$  ;
  - $s(t) = s_1 + \int_{t_1}^t v(t) \cdot dt = s_1 + v_1 \cdot (t - t_1) + \frac{1}{2} \cdot a_m \cdot (t^2 - t_1^2) - a_m \cdot t_1 \cdot (t - t_1) \Rightarrow s(t_2) = s_1 + v_1 \cdot (t_2 - t_1) + \frac{1}{2} \cdot a_m \cdot (t_2 - t_1)^2$  .

Da quanto visto risulta, inoltre, che:

$$(t_2 - t_1) = \frac{v_2 - v_1}{a_m};$$

quindi, sostituendo quest'ultima nell'espressione di  $s_2$ , si ottiene:

$$s(t_2) = s_1 + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2 \cdot a_m};$$

– per  $t_2 < t \leq t_L$

$$\circ j(t) = -j_2;$$

$$\circ a(t) = a_m - j_2 \cdot (t - t_2);$$

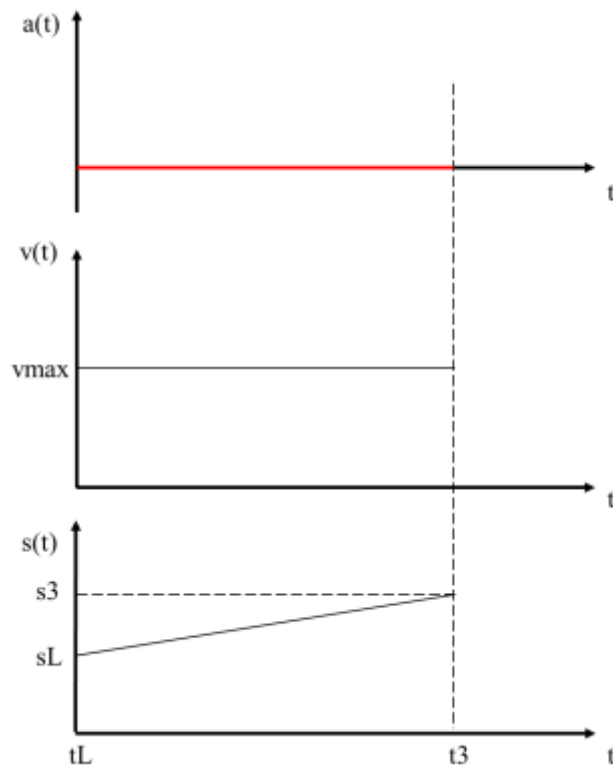
$$\circ v(t) = v_2 + \int_{t_2}^t a(t) \cdot dt = v_2 + a_m \cdot (t - t_2) - \frac{1}{2} \cdot j_2 \cdot (t - t_2)^2 \Rightarrow v(t_L) = v_2 + a_m \cdot (t_L - t_2) - \frac{1}{2} \cdot j_2 \cdot (t_L - t_2)^2;$$

$$\circ s(t) = s_2 + \int_{t_2}^t v(t) \cdot dt = s_2 + v_2 \cdot (t - t_2) + \frac{1}{2} \cdot a_m \cdot (t - t_2)^2 - \frac{j_2}{6} \cdot (t - t_2)^3 \Rightarrow s(t_L) = s_2 + v_2 \cdot (t_L - t_2) + \frac{1}{2} \cdot a_m \cdot (t_L - t_2)^2 - \frac{j_2}{6} \cdot (t_L - t_2)^3.$$

### 2.3.2 Fase di regime

La fase di regime è in moto uniforme e la velocità è costante. Ovviamente, a causa delle resistenze al moto è necessario fornire comunque potenza (sforzo di trazione) per evitare che per inerzia la velocità diminuisca.

I profili delle grandezze cinematiche rispetto al tempo hanno il seguente andamento:



**Figura 18. Diagramma di marcia: fase di regime**

E le funzioni cinematiche assumono le seguenti espressioni:

- per  $t_L < t \leq t_3$ 
  - $j(t) = 0$  ;
  - $a(t) = 0$ ;
  - $v(t) = v_{max} + \int_{t_L}^t a(t) \cdot dt = v_{max} \Rightarrow v(t_3) = v_{max}$ ;
  - $s(t) = s_L + \int_{t_L}^t v(t) \cdot dt = s_L + v_{max} \cdot (t - t_L) \Rightarrow s(t_3) = s_L + v_{max} \cdot (t_3 - t_L)$ .

### 2.3.3 Fase di arresto

Anche in fase di arresto, a causa dell'aderenza limitata al contatto ruota-rotaia (intorno al 30%), i tassi di decelerazione sono bassi per evitare il blocco e lo strisciamento delle ruote. Valori tipici dei tassi di decelerazione sono tra  $0.1$  e  $0.6 \text{ m/s}^2$  (Coline, 2006). I valori più elevati si trovano per i convogli passeggeri metropolitani e suburbani.

Per i veicoli ferroviari si distinguono almeno due tipi di frenatura: frenatura di servizio e frenatura di emergenza. La prima è applicata in condizioni ordinarie di marcia, la seconda per arresti non programmati. La differenza sostanziale consiste nella rapidità con cui viene applicata la forza

frenante: naturalmente in condizioni di emergenza il comfort del passeggero assume un'importanza subordinata alla sicurezza.

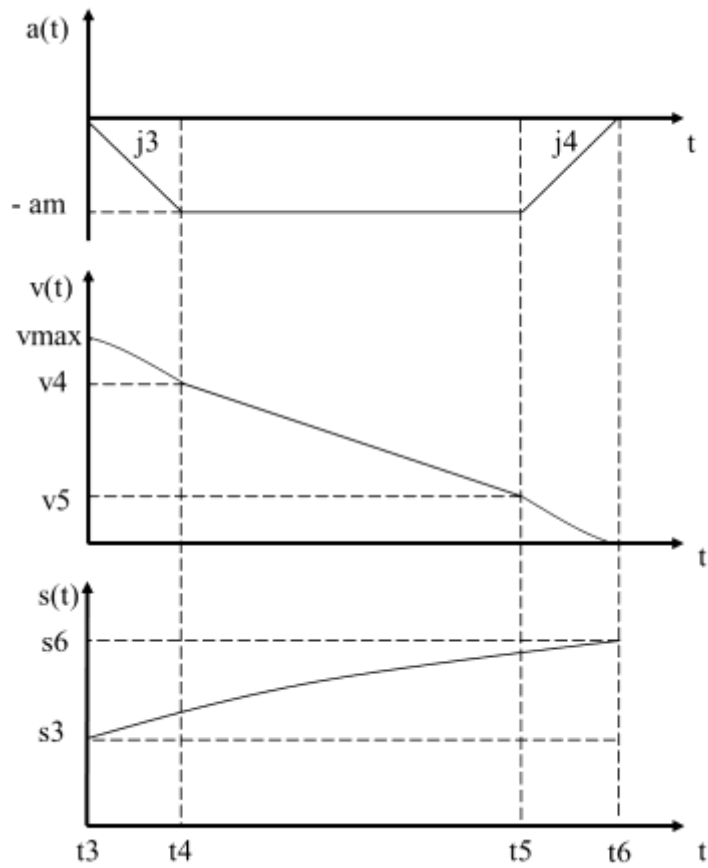
In entrambi i casi, si individua una fase iniziale di transitorio in cui la forza frenante cresce rapidamente (il valore del contraccolpo iniziale applicato dipende dal tipo di convoglio) ed una fase di regime in cui il valore di decelerazione si stabilizza rimanendo costante.

Valori tipici della decelerazione a seconda del tipo di treno sono (Brunger & Dahlhaus, 2008):

- frenatura di servizio:
  - $0.525 \text{ m/s}^2$ , per treni passeggeri suburbani;
  - $0.375 \text{ m/s}^2$ , per treni passeggeri metropolitani;
  - $0.225 \text{ m/s}^2$ , per treni merci;
- frenatura di emergenza:
  - $0.7 \text{ m/s}^2$ , per treni passeggeri suburbani;
  - $0.5 \text{ m/s}^2$ , per treni passeggeri metropolitani;
  - $0.3 \text{ m/s}^2$ , per treni merci.

In generale, la decelerazione di servizio è circa 0,75 volte il valore della decelerazione di emergenza.

In fase di arresto i profili delle grandezze cinematiche hanno il seguente andamento:



**Figura 19. Diagramma di marcia: fase di arresto**

Le funzioni del tempo delle grandezze cinematiche risultano quindi:

– per  $t_3 < t \leq t_4$  :

○  $j(t) = -j_3$

○  $a(t) = -j_3 \cdot (t - t_3) \Rightarrow a(t_4) = -a_m \Rightarrow (t_4 - t_3) = \frac{a_m}{j_3}$  ;

○  $v(t) = v_{max} + \int_{t_3}^t a(t) \cdot dt = v_{max} - \frac{j_3}{2} \cdot (t^2 - t_3^2) + j_3 \cdot t_3 \cdot (t - t_3) \Rightarrow$

$v(t_4) = v_{max} - \frac{j_3}{2} \cdot (t_4^2 - t_3^2) - a_m \cdot t_3$  ;

○  $s(t) = s(t_3) + \int_{t_3}^t v(t) \cdot dt = s(t_3) + (t - t_3) \cdot \left( v_{max} - \frac{j_3 \cdot t_3^2}{2} \right) - \frac{j_3}{6} \cdot (t^3 - t_3^3) +$

$\frac{j_3 \cdot t_3}{2} \cdot (t^2 - t_3^2) \Rightarrow s(t_4) = s(t_3) + \frac{a_m \cdot v_{max}}{j_3} - \frac{a_m \cdot t_3^2}{2} - \frac{j_3}{6} \cdot (t_4^3 - t_3^3) + \frac{j_3 \cdot t_3}{2} \cdot$

$(t_4^2 - t_3^2)$  ;

– per  $t_4 < t \leq t_5$

○  $j(t) = 0$  ;

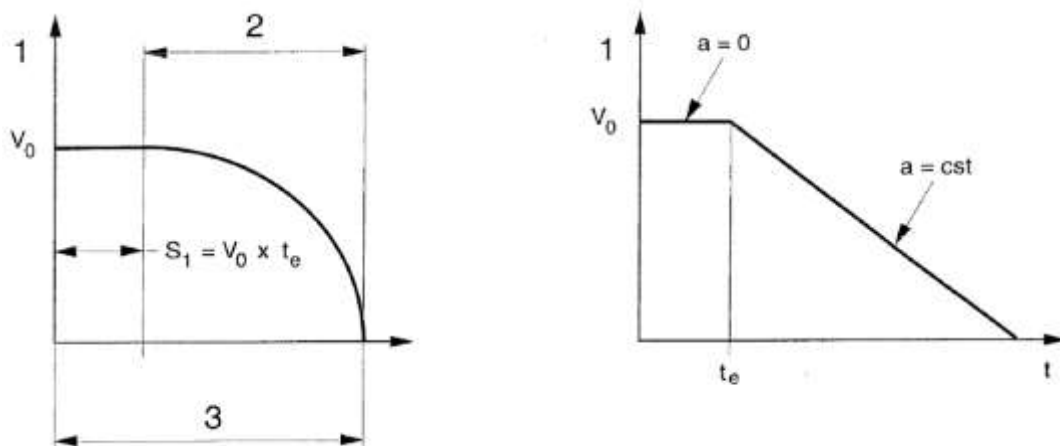
○  $a(t) = -a_m \Rightarrow a(t_5) = -a_m$  ;

- $v(t) = v(t_4) + \int_{t_4}^t a(t) \cdot dt = v(t_4) - a_m \cdot (t - t_4) \Rightarrow v(t_5) = v(t_4) - a_m \cdot (t_5 - t_4) ;$
- $s(t) = s(t_4) + \int_{t_4}^t v(t) \cdot dt = s(t_4) + (t - t_4) \cdot (v(t_4) + a_m \cdot t_4) - \frac{a_m}{2} \cdot (t^2 - t_4^2) \Rightarrow s(t_5) = s(t_4) + (t_5 - t_4) \cdot (v(t_4) + a_m \cdot t_4) - \frac{a_m}{2} \cdot (t_5^2 - t_4^2) .$
- per  $t_5 < t \leq t_6$ 
  - $j(t) = j_4 ;$
  - $a(t) = -a_m + j_4 \cdot (t - t_5) \Rightarrow a(t_6) = 0 \Rightarrow (t_6 - t_5) = \frac{a_m}{j_4} ;$
  - $v(t) = v(t_5) + \int_{t_5}^t a(t) \cdot dt = v(t_5) + (t - t_5) \cdot (-a_m - j_4 \cdot t_5) + \frac{j_4}{2} \cdot (t^2 - t_5^2) \Rightarrow v(t_6) = 0 ;$
  - $s(t) = s(t_5) + \int_{t_5}^t v(t) \cdot dt = s(t_5) + (t - t_5) \cdot (v(t_5) + a_m \cdot t_5 + \frac{j_4 \cdot t_5^2}{2}) + (t^2 - t_5^2) \cdot \left(-\frac{a_m}{2} - \frac{j_4 \cdot t_5}{2}\right) + \frac{j_4}{6} \cdot (t^3 - t_5^3) \Rightarrow s(t_6) = s(t_5) + (t_6 - t_5) \cdot (v(t_5) + a_m \cdot t_5 + \frac{j_4 \cdot t_5^2}{2}) + (t_6^2 - t_5^2) \cdot \left(-\frac{a_m}{2} - \frac{j_4 \cdot t_5}{2}\right) + \frac{j_4}{6} \cdot (t_6^3 - t_5^3) .$

## 2.4 Modelli di frenatura

### 2.4.1 Il modello di frenatura per le linee ad Alta Capacità

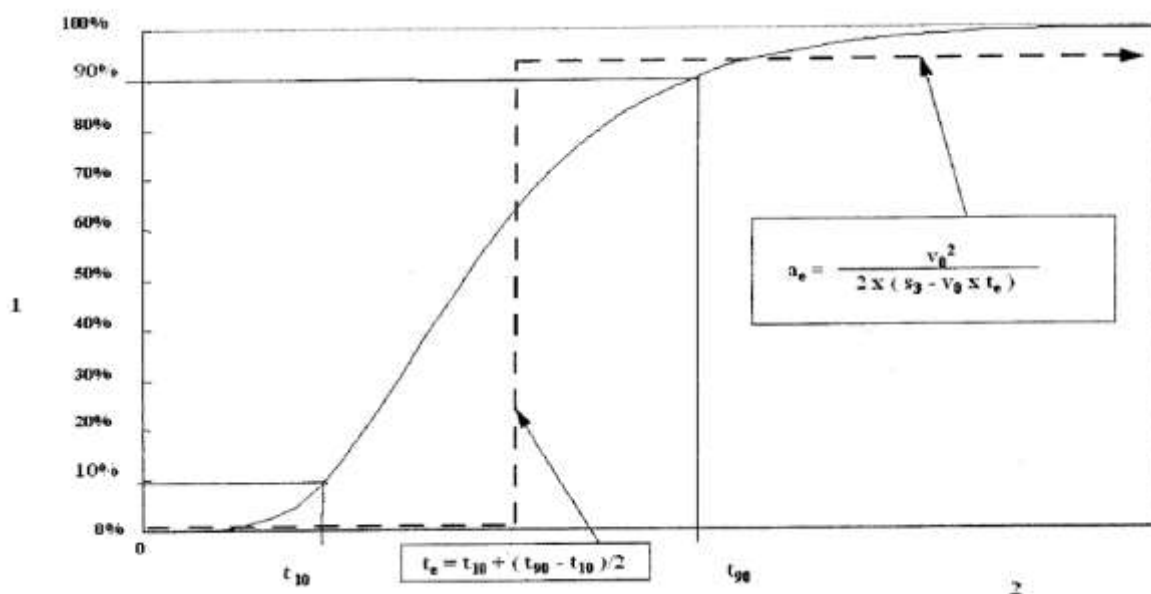
Nei sistemi ferroviari ad alta capacità le prestazioni minime da garantire in frenatura sono definite dalla norma UNI EN 14352 (Parte 1 e parte 2) - *Mass transit brake systems – Performance requirements* (UNI, 2003). Lo *spazio di arresto (stopping distance)* è definito come lo spazio totale percorso dal momento in cui si comanda la frenatura all'istante in cui la velocità è nulla:



**Figura 20. Lo spazio di arresto secondo la UNI EN 14352**

Tale spazio è costituito da uno spazio percorso a velocità costante (in figura  $S_1$ ) ed uno spazio di vera e propria frenatura definito *braking distance* (indicato in figura con 2). Il modello di frenatura definito dalla norma assume, quindi, che per un periodo definito *tempo equivalente* ( $t_e$ ) la decelerazione sia nulla e successivamente stabilizzata intorno ad un valore nominale definito *accelerazione equivalente*.

Il modello assume, in sostanza, una decelerazione costante a tratti cioè con contraccolpo infinito. I valori equivalenti di accelerazione e tempo sono calcolati considerando il reale andamento della decelerazione con contraccolpo variabile:



**Figura 21. Il profilo di velocità in fase di arresto secondo la UNI EN 14352**

Il modello cinematico che meglio rappresenterebbe la realtà sarebbe quello con profilo del contraccolpo trapezoidale. In tal caso l'andamento della decelerazione sarebbe simile a quello mostrato nella precedente figura. La norma UNI assume, invece, un profilo di decelerazione a scalino cioè con contraccolpo infinito. Naturalmente, per evitare di sovrastimare lo spazio di arresto si deve assumere una decelerazione equivalente (cioè che consenta l'arresto in uno spazio uguale a quello ottenuto considerando un profilo di contraccolpo trapezoidale) ed applicata dopo un tempo equivalente così definiti:

$$t_e = t_{10} + \frac{t_{90} - t_{10}}{2}$$

$$a_e = \frac{v_0^2}{2 \cdot (D_{stopping} - v_0 \cdot t_e)}$$

in cui:

$t_{10}$  è il perditempo iniziale;

$t_{90}$  è il tempo di sviluppo della piena decelerazione (*build up time*);

$t - t_{90}$  è il tempo residuo con decelerazione stabilizzata.

La decelerazione equivalente rappresenta la decelerazione istantanea che consente di arrestare il treno nello stesso spazio misurato in fase di collaudo del convoglio (o di ridurre la velocità da un valore iniziale a uno finale prestabiliti).

## 2.4.2 Il modello di frenatura per le linee convenzionali

Per le linee convenzionali si fa riferimento alla norma UNI EN 13452-1 ed alla norma RFI *Prefazione Generale all'Orario di Servizio* (PGOS).

La norma UNI EN definisce per i diversi tipi di treno (Tram, Metropolitana Leggera, Treno Regionale) sia i valori di decelerazione equivalente e tempo equivalente nominali minimi richiesti in frenatura che i valori massimi di decelerazione e contraccolpo per garantire il comfort di marcia.

Le prestazioni di un convoglio di nuova costruzione non possono essere inferiori a quelle riportate nella norma UNI EN. In particolare, questo standard europeo definisce 6 diversi tipi di frenatura:

- la frenatura di servizio (*service braking*) è definita come la frenatura usata per gli arresti o i rallentamenti programmati e può essere azionata sia dal macchinista che dal sistema ATO in caso di guida driverless;
- la frenatura di emergenza (*emergency braking*) è definita come la frenatura azionata per garantire la massima sicurezza dei passeggeri, dello staff di bordo e degli utenti indiretti del sistema di trasporto (cioè in caso di arresti improvvisi). A seconda di chi aziona la



frenatura si distinguono 4 diversi tipi (i valori delle prestazioni cinematiche possono anche essere uguali per tutti i tipi):

Tipo di emergenza	Azionamento ad opera di:
Emergency 1	Macchinista o ATO
Emergency 2	Passeggero (freno manuale nelle carrozze)
Emergency 3	ATP
Emergency 4	Personale autorizzato ma operante non dal banco di guida

- la frenatura di sicurezza (*security braking*) è definita come la frenatura finalizzata a raggiungere il massimo livello di integrità del sistema cioè a contenere il più possibile l'usura ed il degrado dei componenti meccanici del convoglio e della via ferrata. I valori di decelerazione e contraccolpo previsti possono anche essere inferiori di quelli previsti per la frenatura di servizio o di emergenza; in genere, è il Gestore Infrastruttura che può richiedere di adottare tali valori.

Di seguito un esempio con i valori riferiti ad una treno regionale:

**Table 15 — Theoretical operational performances**

	Service	Emergency 1	Emergency 2	Emergency 3	Emergency 4	Security
Minimum deceleration $a_e$ in m/s <sup>2</sup>	variable 0 to 1	1	1	1	1	0,7
Maximum $t_e$ in s	2,5	2,5	2	2	2	2

**Figura 22. Prestazioni in frenatura nominali per treno regionale secondo la norma (UNI EN 14352)**

Per i convogli di vecchia costruzione il riferimento è il PGOS che definisce la velocità massima di un treno in funzione della sua percentuale di peso frenato (che tiene conto della reale capacità frenante del treno, anche in presenza di degradi, e non di quella nominale).

Il PGOS definisce la velocità massima consentita ad un convoglio su una specifica tratta in funzione del grado di frenatura della linea e della percentuale di massa frenata del convoglio. Il grado di frenatura della linea è funzione della pendenza.

Nella seguente figura è riportata la tabella del PGOS riferita ai treni viaggiatori muniti di freno continuo (ve ne sono altre che a seconda degli apparati di sicurezza presenti o del tipo di freno/treno fissano limiti diversi):

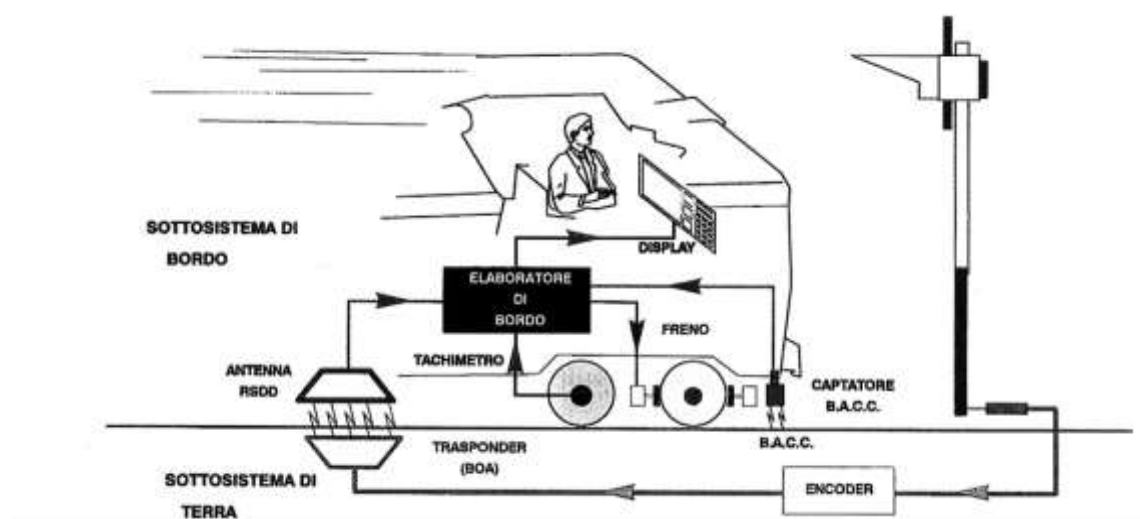
**Treni serviti da freno continuo tipo viaggiatori  
(compresi i treni di mezzi leggeri)**

VELOCITÀ MASSIMA ASSOLUTA AMMESSA																										
Gradi di frenatura della linea	Percentuale di massa frenata esistente nel treno																									
	150	145	140	135	130	125	120	115	110	105	100	95	90	85	80	75	70	65	60	55	50	45	40	35	30	25
I*	150	150	150	150	150	150	145	145	140	140	135	130	125	120	115	110	105	100	95	90	85	80	75	70	65	60
I	150	150	150	150	150	145	145	140	135	135	130	125	120	115	110	105	100	95	90	90	85	80	70	65	60	55
II	150	150	150	150	145	140	140	135	130	130	125	120	115	110	105	100	100	95	90	85	80	75	70	65	55	50
III	150	150	145	145	140	135	135	130	125	120	115	115	110	105	100	100	95	90	85	80	75	70	65	60	50	45
IV	140	140	135	135	130	130	125	125	120	115	110	110	105	100	95	95	90	85	80	75	70	65	60	55	45	40
V	135	130	130	125	125	120	120	115	110	110	105	105	100	95	90	90	85	80	75	70	65	60	55	50	40	35
VI	125	125	120	120	115	115	110	105	105	100	100	95	95	90	85	80	80	75	70	65	60	55	50	40	35	-
VII	115	115	110	110	105	105	100	100	95	95	90	90	85	85	80	75	70	70	65	60	55	45	40	35	-	-
VIII	100	100	100	100	95	95	95	90	90	85	85	80	80	75	70	65	65	60	55	50	45	40	35	-	-	-
IX	90	90	90	90	85	85	85	80	80	75	75	70	70	65	65	60	55	50	45	40	35	30	-	-	-	-

**Figura 23. Tabella delle velocità massime consentite in base alla norma RFI Prefazione Generale all'Orario di Servizio**

### 2.4.3 Il modello di frenatura RFI

Il modello di frenatura definito da RFI nasce per i sistemi ATP del tipo SCMT (Sistema di Controllo Marcia Treno). Il Sistema di Controllo della Marcia del Treno si basa sul distanziamento con blocco fisso ed utilizza una trasmissione di tipo discontinuo: l'aspetto del segnale è comunicato a brodo tramite Punti Informativi (P.I.) posati lungo la sede ferroviaria (boe). Come ogni sistema ATP è costituito da due distinti sottosistemi (SST – Sotto Sistema di Terra e SSB – Sotto Sistema di Bordo) i quali cooperano allo scopo di garantire il controllo della marcia. Nella seguente figura è descritta l'architettura del SCMT:



**Figura 24. Schema dell'ATP di tipo SCMT**

Il Sotto Sistema di Terra consente di realizzare la ripetizione in cabina dell'aspetto del segnale luminoso attraverso le cosiddette boe *commutative*: le boe vengono captate da un'antenna posta sulla pancia del veicolo trasmettendo l'informazione a bordo. Al fine di aggiornare il loro contenuto informativo, coerentemente allo stato della linea, le boe sono connesse ad un'apparecchiatura chiamata "encoder" che traduce l'aspetto del segnale in uno specifico telegramma che viene inoltrato al trasponder (boa).

L'*Encoder* è l'apparato di interfaccia del SST SCMT con gli apparati tradizionali utilizzati in ambito stazione per l'istradamento dei veicoli in linea e le manovre nel piazzale di stazione (*Interlocking*). Tali apparati possono essere del tipo tradizionale (Apparati Centrali Elettrici a pulsanti di Itinerario – ACEI) oppure di nuova generazione (Computer based Interlocking – CB IXL). Gli encoder sono disposti lungo la linea, nel caso di encoder per la trasmissione dell'aspetto del segnale, o in prossimità delle stazioni; hanno il compito di trasmettere contenuti informativi variabili in coerenza con gli itinerari realizzati per la circolazione dei veicoli sia in linea che in ambito stazione.

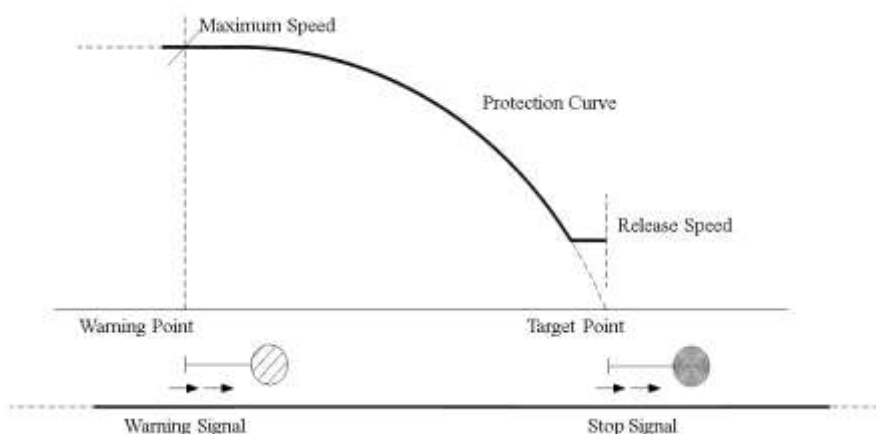
Le informazioni provenienti da terra vengono trasmesse all'elaboratore di bordo che le processa e le utilizza per controllare la marcia del veicolo ed attivare la frenatura di emergenza in caso di necessità.

I PI del tipo fisso (sempre trasponder), invece, sono utilizzati per trasmettere informazioni della linea che non dipendono dalle condizioni di circolazione come ad esempio la progressiva e, per i sistemi più evoluti, la pendenza del tracciato.

Il Sotto Sistema di Bordo coopera con il Sotto Sistema di Terra prendendo dai punti informativi le informazioni discontinue sullo stato dei segnali e sulle caratteristiche della linea, elaborando tali

informazioni e trasmettendo gli opportuni comandi all'apparato motore e/o frenante senza l'ausilio del macchinista.

In particolare, il SSB di un SCMT elabora la curva di frenatura sino alla velocità obiettivo successiva e controlla che la marcia del treno rimanga sempre all'interno di tale curva;



**Figura 25. Curva di protezione per SCMT**

Il SCMT è un sistema ATP nato in Italia per reti non ad alta velocità, ma che si presta ad essere facilmente trasformato in un sistema ETCS di Livello 1.

Il modello RFI per il calcolo della distanza di arresto si basa sulle seguenti ipotesi:

- I. Tempi di trasmissione trascurati;
- II. Errori odometrici trascurati;
- III. Comando di stacco trazione assunto istantaneo e contestuale al comando di frenatura;
- IV. Profilo di decelerazione “a scalino”.

Il modello non contempla i *tempi di trasmissione* dell'informazione cioè i tempi necessari alle diverse tecnologie di terra impiegate nel SCMT per trasmettere l'aspetto del segnale di linea in cabina. In particolare, questi tempi sono quelli necessari a trasmettere, da parte del sistema di controllo della stazione e/o della linea, le informazioni di selezione del telegramma all'encoder. Tale informazione, infatti, consente all'encoder di effettuare l'elaborazione necessaria alla trasmissione del telegramma alle boa (transponder) ad esso connessa.

Invece, il modello si limita a considerare i *tempi di elaborazione* dell'informazione cioè i tempi necessari al SSB per captare il segnale dalla boa, elaborarlo e tradurlo nei comandi opportuni (es. stacco trazione e/o azionamento freni).

Pertanto, con la prima ipotesi si trascura un perditempo e l'istante di inizio della manovra di arresto coincide con l'istante di stacco trazione.

La velocità attuata dal veicolo e lo spazio percorso dall'ultimo punto informativo sono calcolati dal sistema odometrico di bordo che conosce il raggio delle ruote e misura il numero di giri in funzione del tempo. Gli errori odometrici nascono per due aspetti:

- il raggio della ruota non è costante né rispetto al profilo del cerchione, a causa dei difetti di lavorazione, né rispetto al tempo a causa dell'usura della stessa;
- il moto della ruota sul piano di appoggio non è un moto di pura roto-traslazione, ma è caratterizzato da piccoli scorrimenti ruota-rotaia che non possono e non sono misurati dall'odometro.

A causa di questi fenomeni lo spazio percorso reale e la velocità di avanzamento reale si discostano da quelle misurate a bordo treno.

La terza ipotesi richiama l'attenzione sul fatto che nel calcolo dello spazio di frenatura si trascurano i perdimenti connessi sia all'invio del comando di stacco trazione che alla sua attuazione.

Per spiegare la quarta ed ultima ipotesi è necessario fare una breve premessa.

In generale, al fine di descrivere la decelerazione longitudinale applicata ad un veicolo durante una manovra di arresto si distinguono due fasi successive:

- *di transitorio* in cui la variazione della decelerazione in funzione del tempo è caratterizzata da una curva con pendenza variabile (cioè il contraccolpo è una funzione del tempo lineare o costante);
- *di regime* in cui la decelerazione si mantiene pressoché costante.

Nella fase di transitorio la decelerazione applicata al veicolo aumenta progressivamente a partire dal valore nullo in quanto, a partire dal comando freno, si genera una depressione nella condotta generale e successivamente l'onda di depressione si propaga per tutta la lunghezza del veicolo azionando da testa a coda i singoli distributori dei freni pneumatici.

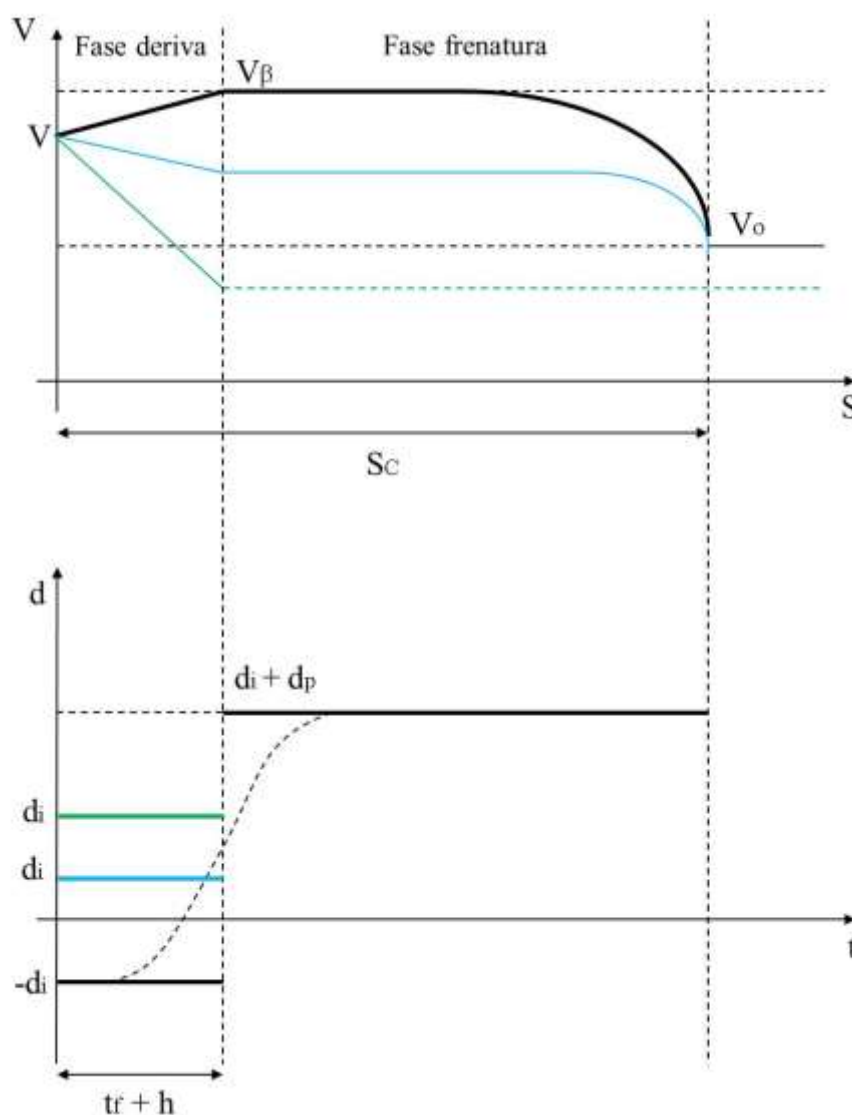
Nella fase di regime si assume che la decelerazione abbia raggiunto il suo valore massimo e si mantenga costante in funzione del tempo. In realtà, anche durante la fase di regime la decelerazione varia in funzione della velocità istantanea del veicolo a seconda delle caratteristiche specifiche degli organi frenanti. Tuttavia, nella pratica, la decelerazione in fase di regime è ipotizzata costante e ciò equivale a dire che non solo lo sforzo frenante è stato applicato a tutti gli assi del veicolo, ma che ha raggiunto anche il valore massimo ammissibile con l'aderenza.

Il modello SCMT adotta un profilo di decelerazione nella fase di arresto con un andamento tipico "a scalino" che è caratterizzato da due fasi:

- a decelerazione nulla, cd. "fase di deriva";
- a decelerazione costante e pari al valore massimo, cd. "fase di frenatura".

Questa ipotesi consente una notevole semplificazione di calcolo senza causare approssimazioni svantaggiose ai fini della sicurezza. Infatti, adottando un tale profilo di decelerazione si assume che il valore di decelerazione passi istantaneamente da zero al valore massimo; tuttavia, imponendo che lo spazio percorso nella fase iniziale (cioè a decelerazione nulla) sia uguale a quello percorso nella fase transitoria si ottiene il tempo in cui deve assumersi la decelerazione nulla cioè il cosiddetto "tempo equivalente". Superato tale periodo può assumersi la decelerazione pari a quella massima e costante per l'intera fase di arresto.

Nella seguente figura sono mostrati i diagrammi del moto utilizzati nel modello SCMT:



**Figura 26. La funzione della decelerazione "a gradino" del modello di frenatura SCMT**

In figura è mostrato l'andamento tipico della velocità in funzione dello spazio. Il modello definisce una serie di valori caratteristici che può assumere la velocità istantanea del veicolo:

- la *velocità obiettivo*,  $V_O$ . Tale valore è definito dal SSB in funzione delle informazioni ricevute dal SST (segnale a via impedita o codice di velocità) ed è una variabile di input del modello di frenatura. La manovra di frenatura termina quando la velocità del veicolo ha raggiunto il valore obiettivo;
- la *velocità iniziale*,  $V$ . Tale valore è quello della velocità attuata dal veicolo nell'istante di inizio frenatura ed è una variabile di input del modello. Il SSB acquisisce questo valore dal sistema odometrico di bordo.
- la *velocità inizio frenatura*,  $V_\beta$ . Valore di velocità raggiunto al termine della fase di deriva (decelerazione applicata nulla). Essa è una variabile di output del modello che caratterizza il comportamento cinematico del veicolo al termine del transitorio.

In figura 4 sono diagrammati tre casi possibili:

- tracciato in discesa (curva nera);
- tracciato in salita e  $V_\beta > V_O$  (curva celeste);
- tracciato in salita e  $V_\beta \leq V_O$  (curva verde).

Il diagramma dell'accelerazione in funzione del tempo presenta il tipico andamento a scalino: in figura sono presentati diversi casi possibili. In particolare, sono definiti due valori caratteristici della decelerazione:

- la *accelerazione di pendenza*,  $d_i$ , che è l'accelerazione indotta sul veicolo in caso di tracciato in pendenza;
- la *accelerazione pneumatica*,  $d_p$ , che è l'accelerazione indotta sul veicolo dall'apparato frenante (freno pneumatico).

Inoltre, il comportamento del veicolo nella fase di deriva è caratterizzato dal parametro  $\text{ritardo} = t_f + h$  dove:

- $t_f$  è il *tempo freno* cioè il ritardo associato alla propagazione della depressione nella condotta generale dell'apparato frenante. Durante tale periodo, infatti, il modello assume che ai freni non sia applicata alcuna forza e, quindi, che la decelerazione indotta dai freni sia nulla.
- $h$  è il *ritardo SSB* cioè il ritardo relativo all'apparato di bordo del SCMT per inviare il comando di frenatura.

Il modello analitico si basa sull'integrazione delle grandezze cinematiche fondamentali (accelerazione, velocità e spazio) che variano ad ogni istante della fase di frenatura.

Lo spazio di frenatura  $S_C$  è ricavato come somma degli spazi percorsi per ciascun passo di integrazione, considerando le variazioni di velocità e di accelerazione. Per il generico istante  $t$ , lo spazio di frenatura è calcolato considerando la velocità costante durante il perditempo iniziale ed ipotizzando il moto uniformemente decelerato nella fase di frenatura:

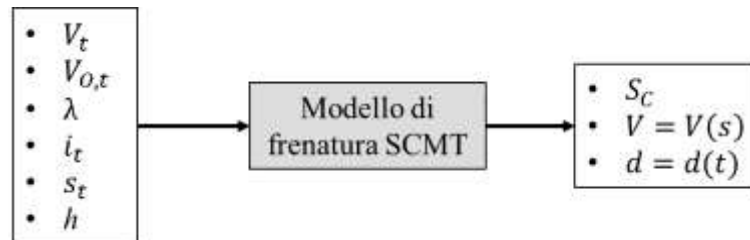
$$S_{C,t} = (h + t_f) \cdot V_\beta + \frac{V_\beta^2 - V_O^2}{2 \cdot (d_p + d_i)}$$

Le variabili di ingresso del modello sono:

- $V$ , velocità iniziale;
- $V_O$ , velocità obiettivo;
- $\lambda$ , percentuale di massa frenata;
- $i$ , pendenza del tracciato;
- $s_t$ , progressiva come da ultimo Punto Informativo;
- $h$ , tempo di ritardo SSB.

Per ogni istante  $t$  della fase di frenatura il modello matematico fornisce i valori di velocità attuata dal veicolo e di spazio percorso. A partire da questi è possibile ottenere:

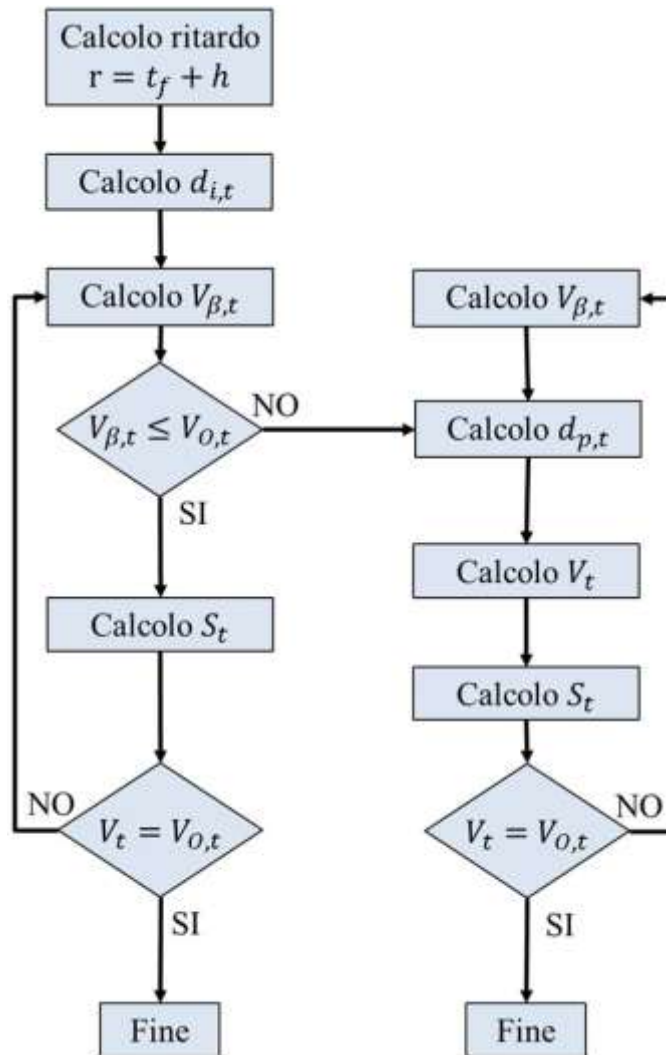
- lo spazio di frenatura  $S_C$ ;
- il profilo spazio-velocità  $V = V(s)$ ;
- il profilo tempo-decelerazione  $d = d(t)$ .



**Figura 27. Variabili di ingresso/uscita del modello di frenatura SCMT**

A partire dalle variabili di ingresso, la procedura di calcolo si svolge attraverso i seguenti passi come schematizzato nella seguente figura:





**Figura 28. Diagramma di flusso dell'algoritmo del modello di frenatura SCMT**

Nei seguenti paragrafi è descritto ciascuno step di calcolo.

#### **Calcolo ritardo**

Uno dei due parametri fondamentali alla base del modello di frenatura per SCMT è il *ritardo* associato all'inizio della frenatura effettiva. Tale parametro costituisce, quindi, il periodo di tempo durante il quale il veicolo marcia in un regime cosiddetto “di deriva” cioè in assenza degli sforzi di trazione e frenante, sottoposto all'azione della forza di gravità che può agire a favore o contro il moto di avanzamento (generando un'accelerazione o una decelerazione).

Il calcolo del ritardo iniziale relativo all'azionamento dei freni è ottenuto come somma di due aliquote:

$$r = t_f + h$$

dove:

- $t_f$  è ritardo relativo all'apparato frenante del veicolo. Esso è calcolato in funzione di:
  - o tipo di treno (Viaggiatori/Merci);
  - o lunghezza convoglio;
  - o tipo di freno (Viaggiatori/Merci);
  - o efficienza del freno elettropneumatico (efficiente/inefficiente);
- $h$  è il ritardo relativo all'apparato ATP di bordo (SSB) cioè il tempo tipico del SSB per comandare lo stacco trazione e l'azionamento freni. È un parametro caratteristico dell'apparato di bordo del SCMT.

### Calcolo $t_f$

Il modello SCMT assume che la tipologia di sistema frenante sia conforme alle norme UIC 540 e 547 ed alle norme tecniche contenute nella *Prefazione Generale all'Orario di Servizio* (PGOS) di RFI; pertanto, assume che il veicolo sia dotato di freno continuo ad aria compressa e che garantisca i requisiti generali di *continuità, automaticità, moderabilità ed inesauribilità*.

Il ritardo indicato nel modello come  $t_f$  è quello dovuto alla propagazione della depressione nella condotta generale dell'apparato frenante. Durante tale periodo, infatti, il modello assume che ai freni non sia applicata alcuna forza e, quindi, che la decelerazione indotta dai freni sia nulla.

Un freno continuo a norma prevede che la frenatura possa essere del tipo *viaggiatori* cioè ad azione immediata o del tipo *merci* cioè ad azione rallentata. Ciò significa che il veicolo è dotato di un dispositivo integrativo delle normali apparecchiature del freno che consente, tramite pannello di comando in cabina, di far assumere al freno il regime tipo viaggiatori o tipo merci.

Il regime tipo *viaggiatori* prevede che la pressione nei cilindri dei freni aumenti o diminuisca (frenatura o sfrenatura) rapidamente ed in maniera continua fino al valore massimo. In tal caso si ottiene una frenatura in tempi brevi, con valori tra 3 e 5 secondi in frenatura e tra 15 e 20 secondi in sfrenatura, che risulta necessaria per le elevate velocità attuate dai veicoli passeggeri.

Un periodo di transitorio per la decelerazione rapido è ammesso solo per convogli passeggeri per i quali è possibile trascurare gli urti e le conseguenze delle forze di mutuo accoppiamento tra carrozze in quanto:

- si può assumere che l'azione del freno sia istantanea e contemporanea per tutte le carrozze;
- gli organi di serraggio tra carrozze sono serrati a fondo ed il giogo tra di esse è minimo.

Tuttavia, per attuare un regime di frenatura del tipo *viaggiatori* il rodiggio non deve superare i 120 assi.

Il regime di tipo *merci* prevede che l'aumento di decelerazione sia rapido solo per una brevissima fase iniziale durante la quale si attinge uno sforzo frenante non superiore al 20% di quello massimo

applicabile e, successivamente, sia graduale fino al valore massimo con tempi dell'ordine dei 18 – 30 secondi. Analogamente anche la fase di sfrenatura è oltremodo graduale impiegando tempi tra i 45 ed i 60 secondi.

Per i convogli merci, in cui la lunghezza può raggiungere anche i 1000 m ed in cui gli organi di serraggio sono serrati in modo da consentire movimenti relativi tra le carrozze non trascurabili, la frenatura graduale è indispensabile per attutire urti e tamponamenti. In questo caso la composizione del rodiggio non deve superare i 200 assi.

A seconda se l'apparato frenante è posto in regime di frenatura del tipo *viaggiatori* o *merci* il ritardo dovuto alla propagazione della depressione nella condotta generale dipende dalla lunghezza del treno ed è calcolato con le seguenti espressioni parametriche a coefficienti di origine sperimentale che considerano l'aspetto fluidodinamico della propagazione della depressione:

$$t_{f,V} = a_V + b_V \cdot \frac{L \cdot (1 - EP)}{100} + c_V \cdot \left( \frac{L \cdot (1 - EP)}{100} \right)^2$$

$$t_{f,M} = a_M + b_M \cdot \frac{L}{100} + c_M \cdot \left( \frac{L}{100} \right)^2$$

Dove

$L$  è la lunghezza del convoglio corretta in base al tipo di treno (*viaggiatori/merci*) ed al tipo freno (*viaggiatori/merci*);

$EP$  vale **1** in presenza di freno elettropneumatico inserito ed efficiente, vale **0** in caso di freno elettropneumatico assente, disinserito o inefficiente.

In particolare, se il freno è del tipo *viaggiatori*

$$t'_f = t_{f,V}$$

Se, invece, il freno è del tipo *merci*

$$t'_f = \max(t_{f,V}, t_{f,M})$$

Il valore così ottenuto di  $t'_f$  viene corretto da un coefficiente di sicurezza che dipende dal valore della *velocità obiettivo*  $V_o$  (nulla o diversa da zero) e dal valore della *velocità iniziale*  $V$  :

$$t_f = k_t \cdot t'_f$$

Per quanto riguarda il valore del ritardo  $h$  si precisa che esso è una caratteristica specifica del SSB e deve essere fornito come variabile di ingresso al modello.

#### **Calcolo decelerazione**

Il secondo parametro fondamentale del modello è la *decelerazione* che è descritta come una funzione a scalino del tempo. Nella fase di transitorio la decelerazione è nulla, mentre viene assunta costante e pari al valore massimo per tutta la fase di regime.

La decelerazione complessiva a cui il veicolo è sottoposto è costituita da due contributi:

- $d_i$ , accelerazione o decelerazione dovuta alla pendenza del tracciato;
- $d_p$ , decelerazione dovuta all'azione dei freni.

Anche in questo caso il modello applica dei coefficienti correttivi ad entrambe.

### Calcolo $d_i$

Il valore della pendenza del tracciato è fornito al SSB dalle boe fisse del sottosistema di terra. Esso dipende sia dalla tipologia dei *Balise Groups* (infatti in alcuni pacchetti 44 non è prevista l'informazione di pendenza del tracciato) sia dall'attrezzaggio della linea (ad esempio alcune tipologie di segnali non prevedono l'aspetto di rosso e non hanno un valore finito di pendenza del tracciato).

Il modello di frenatura per SCMT fornisce lo spazio di arresto assumendo un unico valore di pendenza per tutto il tratto di linea compreso tra la testa del veicolo ed il punto obiettivo.

La decelerazione dovuta alla pendenza del tracciato è ricavata a partire dalla pendenza  $i$  della linea come:

$$d_i = K_i \cdot g \cdot i$$

dove:

$g$  è l'accelerazione di gravità [ $m/s^2$ ];

$i$  è la pendenza del tracciato espressa come numero puro [-];

$k_i$  è un coefficiente che dipende dalla forza di inerzia ed è funzione della pendenza del tracciato [-].

### Calcolo $d_p$

Il valore di decelerazione dovuta all'azione dei freni, che è ritenuto costante dal modello nella fase di frenatura a regime, è un valore corretto della decelerazione nominale attraverso una serie di coefficienti di protezione:

$$d_p = k_r \cdot k_v \cdot k_L \cdot k_{v0} \cdot d_r$$

Dove

$k_r$  tiene conto della dispersione delle prestazioni frenanti intorno al valore medio;

$k_v$  utilizzato per alte velocità;

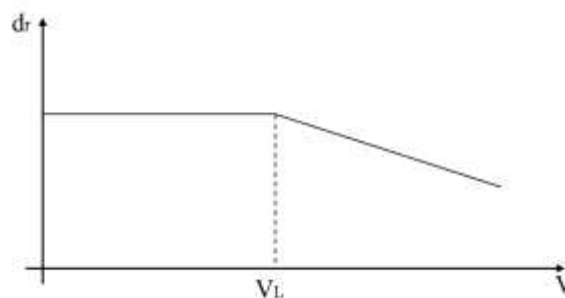
$k_L$  tiene conto del diverso livello di protezione da offrire al variare della velocità e dell'integrazione con la normativa;

$k_{v_0}$  dipende dalla *velocità obiettivo* e dalla *velocità iniziale*;

$d_r$  è la decelerazione nominale ed è funzione della percentuale di peso frenato.

In particolare, la decelerazione nominale è ricavata come specificato nella fiche UIC 544-1. Nella seguente figura è mostrato l'andamento della decelerazione nominale in funzione della velocità di inizio frenatura: per valori di velocità iniziale superiori al valore di soglia  $V_L$  la decelerazione aumenta linearmente al diminuire della velocità; essendo  $\lambda$  la percentuale di peso frenato, tale valore di soglia si ottiene come:

$$V_L = 16.7 \cdot \lambda^{0.443} \quad \left[ \frac{km}{h} \right]$$



**Figura 29. Decelerazione nominale secondo la norma UIC 544-1**

A seconda se la velocità iniziale sia maggiore o minore del valore di soglia la decelerazione nominale dovuta ai freni si ottiene come da norma UIC 544:

$$d_r = \begin{cases} A \cdot \lambda + B & \text{se } V \leq V_L \\ (A \cdot \lambda + B) \cdot [1 - C \cdot (V - V_L)] & \text{se } V > V_L \end{cases}$$

Le costanti A, B e C dipendono dalla velocità iniziale di frenatura, sono di origine sperimentale e sono fornite dalla norma stessa.

Dove A, B e C sono parametri sperimentali definiti dalla stessa norma.

### Calcolo $V_\beta$

La *velocità inizio frenatura*,  $V_\beta$ , è calcolata come:

$$V_\beta = V - d_i \cdot (t_f + h)$$

Dove  $V$  è la velocità iniziale. Il modello di frenatura SCMT contempla la possibilità del verificarsi di due condizioni: la velocità di inizio frenatura è maggiore della velocità obiettivo oppure minore o uguale.

Caso 1:  $V_\beta \leq V_O$

Se si verifica questa condizione significa che la fase di deriva non è bastata per portare la velocità del veicolo a quella obiettivo e, quindi, è necessario applicare anche lo sforzo frenante. Potrebbe, infatti, verificarsi la circostanza in cui le sole resistenze al moto siano sufficienti a vincere la forza di inerzia, che imprime il moto al veicolo, rallentandolo sino al valore obiettivo di velocità.

In particolare, se  $V_\beta = V_O$  significa che il veicolo ha raggiunto la velocità obiettivo e, quindi, la manovra di frenatura può terminare.

Se, invece,  $V_\beta < V_O$  significa che il veicolo ha raggiunto una velocità addirittura minore di quella obiettivo e, quindi, è necessaria una manovra di accelerazione piuttosto che di frenatura.

Caso 2:  $V_\beta > V_O$

Se si verifica questa condizione significa che la velocità di inizio frenatura è maggiore della velocità obiettivo e, quindi, ha inizio la vera e propria fase di frenatura. Pertanto, viene calcolata la decelerazione dovuta all'azione dei freni come:

$$d_p = k_r \cdot k_v \cdot k_L \cdot k_{vO} \cdot d_r$$

dove  $d_r$  è la decelerazione nominale funzione della percentuale di massa frenata [ $\text{m/s}^2$ ], i coefficienti  $k$  sono dei coefficienti di sicurezza che tengono conto della dispersione delle prestazioni frenanti intorno al valore medio, della normativa e del livello di protezione da offrire al variare della velocità e  $V_L$  è il valore soglia di velocità che, per un dato valore di percentuale di massa frenata, segna il passaggio da una fase transitoria della decelerazione (in cui la decelerazione aumenta al diminuire della velocità di avanzamento del veicolo) ad una fase a regime (in cui la decelerazione si mantiene costante al diminuire della velocità). Il modello rispetta quanto prescritto dalla norma UIC 544: nel transitorio assume un aumento della decelerazione lineare al diminuire della velocità ed il valore di soglia è ottenuto come  $V_L = 16,17 \cdot \lambda^{0,443}$ .

Infine,  $d_r$  è la decelerazione nominale ed è calcolata in accordo alle disposizioni della norma UIC 544 e cioè:

$$d_r = \begin{cases} A \cdot \lambda + B & \text{se } V \leq V_L \\ (A \cdot \lambda + B) \cdot [1 - C \cdot (V - V_L)] & \text{se } V > V_L \end{cases}$$

#### Calcolo $S_t$

Il calcolo dello spazio percorso nel generico passo di integrazione si differenzia a seconda se sia stata raggiunta o meno la velocità obiettivo durante la fase di deriva.

Se  $V_\beta \leq V_O$ :

$$S_{C,t} = (h + t_f) \cdot V_\beta \quad \text{se } 0 < t \leq (t_f + h)$$

Se  $V_\beta > V_O$ :

$$S_{C,t} = (h + t_f) \cdot V_\beta + \frac{V_\beta^2 - V_O^2}{2 \cdot (d_p + d_i)} \quad \text{se } t > (t_f + h)$$

### 2.4.4 Il modello di frenatura per le linee ad Alta Velocità: le curve dell'E.R.A.

L'European Railway Agency (E.R.A.) ha avviato nel 2012 un complesso processo di armonizzazione dei modelli di calcolo delle curve di frenatura applicati nei sistemi ETCS. Tale processo ha incontrato non poche difficoltà dovute alla non sempre chiara separazione di responsabilità tra il Gestore Infrastruttura ed il Gestore Trasporto. Motivo per il quale nello standard ETCS vi è una chiara suddivisione in sottosistema di terra e sottosistema di bordo.

Un ulteriore aspetto critico riguarda la definizione dei margini di sicurezza che dipendono dal livello di sicurezza richiesto per l'esercizio ferroviario e che possono variare notevolmente da un paese ad un altro. Spesso non è possibile definire un margine di sicurezza relativo al sottosistema di terra ed uno al sottosistema di bordo o peggio non sono chiaramente individuabili.

Pertanto, il processo di armonizzazione dei modelli di calcolo delle curve di frenatura implica che, oltre ad avere una chiara distinzione delle competenze e dei compiti di GI e GT:

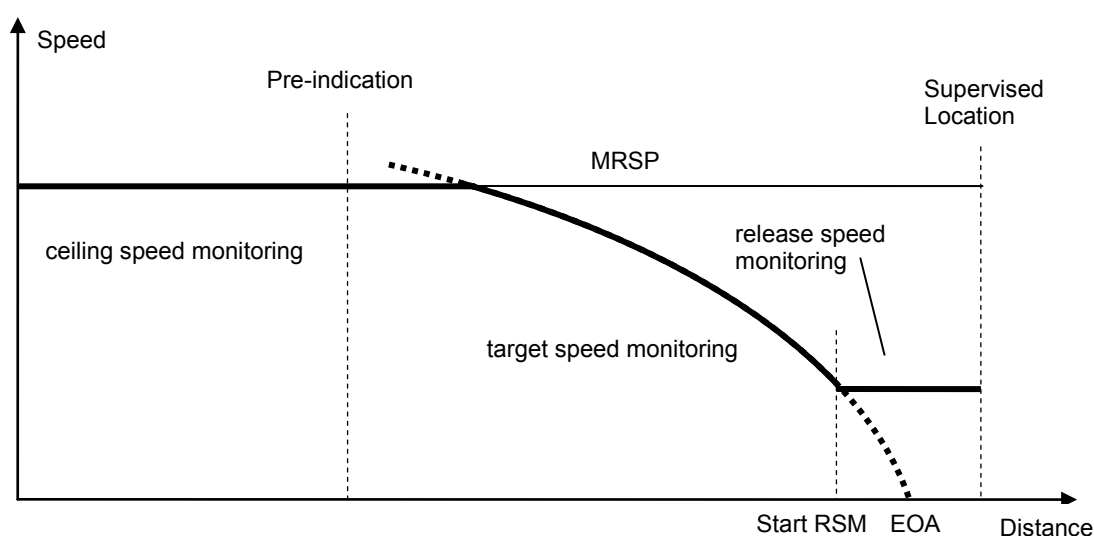
- che il comportamento di un veicolo sia completamente prevedibile grazie alle curve di frenatura per esso calcolate;
- i margini di sicurezza, che indicano quanto sia affidabile la curva di frenatura calcolata, possono essere distinti senza ambiguità tra il sottosistema di terra e quello di bordo.

#### 2.4.4.1 La funzione di supervisione

Un sistema ETCS è in grado di supervisionare sia la posizione che la velocità del veicolo al fine di garantire che non vengano mai superati i limiti consentiti e, se necessario, di azionare il sistema frenante per evitare qualsiasi rischio di sfornamento di tali limiti.

A seconda di quanto la testa del veicolo sia prossima alla *target location*, cioè al punto in cui è prevista una velocità minore, il controllo della velocità da parte del computer di bordo ETCS può essere di tre tipi:

- *ceiling speed monitoring* (CSM);
- *target speed monitoring* (TSM);
- *release speed monitoring* (RSM);



**Figura 30. Le regioni di supervisione secondo lo standard ETCS**

Il CSM è la funzione di supervisione ed intervento nella regione in cui il treno può viaggiare alla velocità consentita dal *Most Restrictive Speed Profile* (MRSP) cioè dal profilo di velocità massima consentita sulla tratta che tiene in considerazione tutti i vincoli statici (curve, presenza di cantieri, tratti in viadotto, ponti, ecc) ad esclusione di quelli derivanti dal segnalamento cioè dei vincoli dinamici. In tale regione il veicolo non deve rallentare.

Il TSM è la funzione di supervisione ed intervento nella regione che inizia dal punto in cui il macchinista è informato dell'esistenza di una target location (punto di *Pre-indication*) ed in cui il veicolo deve rallentare.

Il RSM è la funzione di supervisione ed intervento nella regione prossima al punto obiettivo in cui, se il veicolo ha raggiunto la cosiddetta *release speed* cioè la velocità prevista per quella posizione dalla curva di frenatura, il sistema di supervisione termina la funzione di intervention.



Per svolgere queste funzioni di supervisione e comando il computer di bordo ETCS deve prevedere, nel senso di determinare a priori, il profilo di decelerazione del veicolo usando un modello analitico in cui sono considerate sia le grandezze cinematiche in fase di arresto che le caratteristiche geometriche e di aderenza del tracciato a valle. Tale previsione di come vari la velocità in funzione della distanza è definita *curva di frenatura (braking curve)*. Attraverso questa previsione il computer di bordo calcola in tempo reale le distanze di arresto che sono utilizzate anche per assisterlo nella guida e garantire il comfort di marcia nonché per le funzioni di ATP.

La curva di frenatura relativa ad una frenatura di emergenza è definita *Emergency Brake Deceleration (EBD)*. Il computer di bordo riceve da terra la posizione in cui è prevista una velocità minore di quella consentita sulla tratta attraversata o un punto di arresto ed in base a questa posizione e velocità obiettivo (*target position* e *target speed*) elabora una curva di frenatura deterministica che dipende sia dalle caratteristiche fisico-prestazionali dei veicoli che dalle caratteristiche del tracciato.

A partire dalla curva EBD e dalla velocità del veicolo misurata, il computer di bordo ETCS calcola in tempo reale la distanza necessaria per arrestare o decelerare il veicolo fino alla velocità target dal momento in cui l'ETCS di bordo sarebbe in grado di comandare la frenatura di emergenza. Per il calcolo di tale distanza sono assunte le condizioni peggiori sia per quanto riguarda le caratteristiche cinematiche durante il periodo necessario a sviluppare il massimo sforzo frenante (*emergency brake build up time*) considerando l'accelerazione misurata del veicolo, che per la velocità corrente misurata per la quale sono considerati gli errori odometrici.

La distanza necessaria all'arresto (cioè a raggiungere la velocità target) con la decelerazione di emergenza massima individua il cosiddetto punto di *Emergency Braking Intervention (EBI)* che è il punto di supervisione superato il quale l'ETCS inibisce la guida manuale e acquisisce la funzione di comando sul veicolo.

La curva EBD ed il risultante punto di supervisione EBI costituiscono gli elementi grazie ai quali un sistema ETCS elimina qualsiasi rischio che venga oltrepassato un segnale rosso o una velocità massima consentita (cd. *override*).

Oltre a questa funzione di *train stop*, l'ETCS svolge anche la funzione di avviso al macchinista realizzando una guida assistita per garantire comfort e sicurezza. Infatti, il computer di bordo elabora in tempo reale anche altri punti di supervisione:

- *Indication (I)*;
- *Permitted speed (P)*;
- *Warning (W)*;
- *Service Brake Intervention (SBI)*.

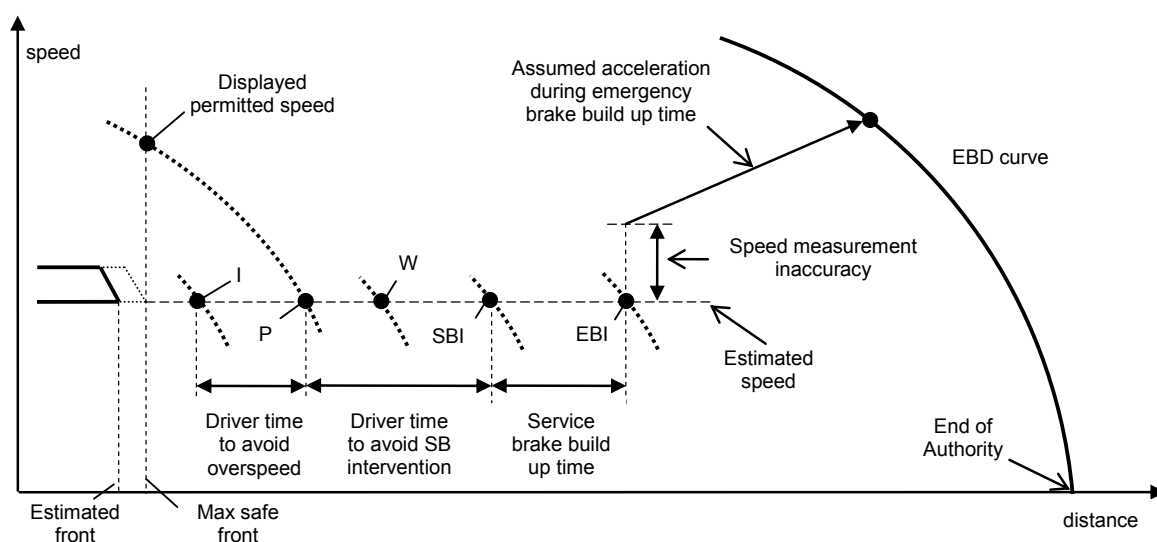
Questi punti, individuati come progressive sul tracciato, se oltrepassati dal veicolo originano dei messaggi di avviso al macchinista (grafici ed acustici) sul cruscotto di guida.

L'Indication point serve ad avvisare in anticipo il macchinista di iniziare a decelerare con una decelerazione di servizio in modo che non venga oltrepassata la Permitted speed. Il punto I consente al macchinista di effettuare la transizione dalla zona supervisione della velocità massima (*ceiling speed supervision*) alla zona di decelerazione (*target speed supervision*) senza superare la permitted speed.

Il punto di supervisione P è concepito per fornire al macchinista un tempo aggiuntivo per azionare la frenatura di servizio in modo che il veicolo non oltrepassi il punto che provocherebbe l'azionamento dei freni da parte dell'ETCS.

Il punto di supervisione W fornisce fa scattare un messaggio di allarme acustico dopo che è stato oltrepassata la permitted speed.

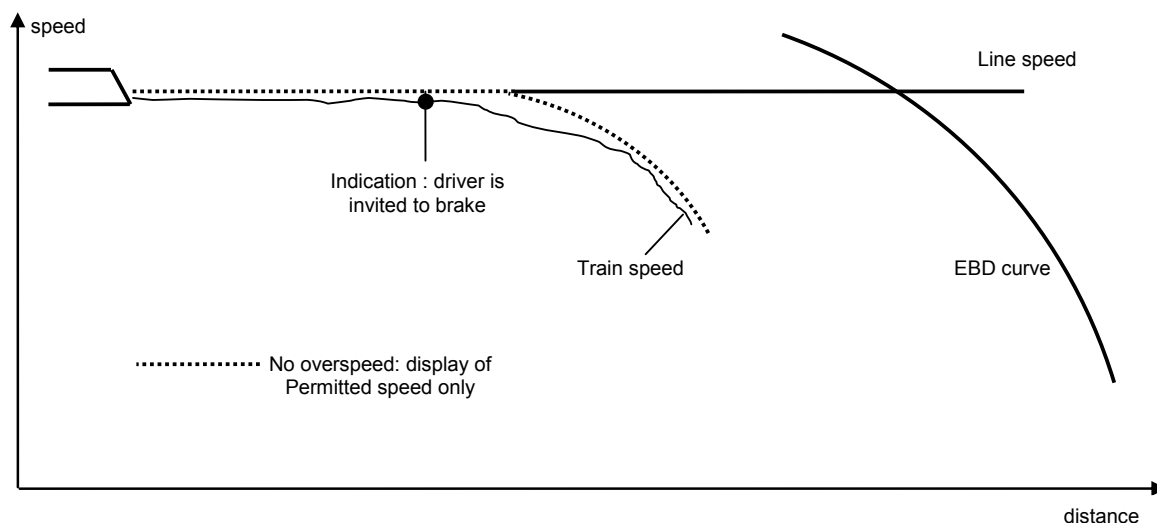
Il punto di supervisione SBI serve ad evitare che, dopo che l'ETCS ha comandato la decelerazione di servizio, durante il periodo di sviluppo della piena decelerazione di servizio venga oltrepassato il limite. Il punto di supervisione SBI non è obbligatorio per lo standard ETCS e viene utilizzato in caso si vogliano evitare frenature di emergenza frequenti che comportano l'usura di ruote e rotaie.



**Figura 31: Curva di frenatura di emergenza e punti di supervisione dello standard ETCS**

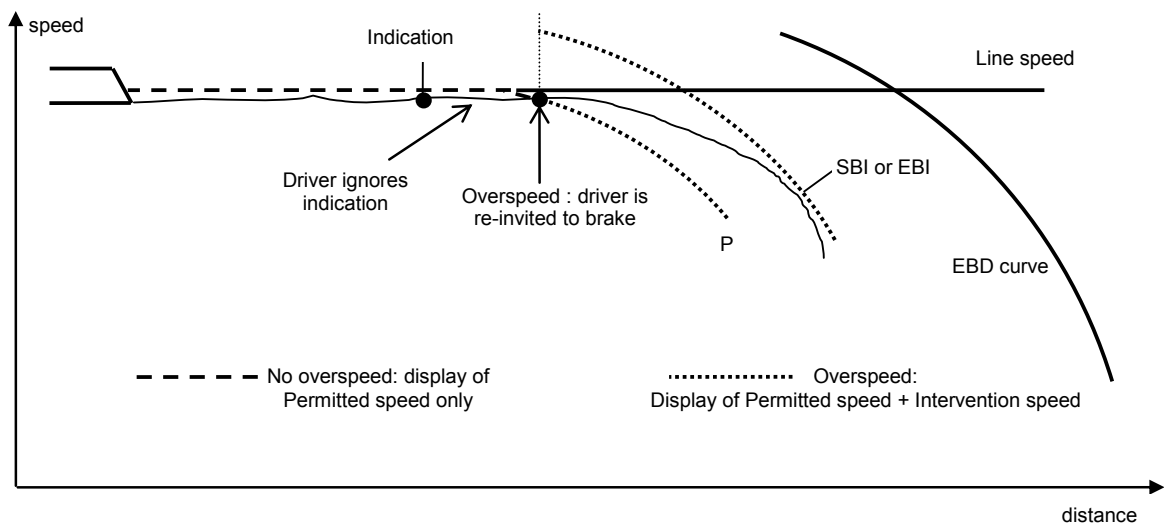
Come è possibile notare dalla figura 30 la Permitted speed calcolata dal sistema ETCS è sempre maggiore della reale velocità del veicolo e questo è dovuto alla necessità di considerare gli errori odometrici e le fasi di deriva con eventuali eccessi della velocità consentita (*overspeed*) a vantaggio di sicurezza.

Il computer di bordo ETCS visualizza costantemente al macchinista solo la Permitted speed (curva a puntini in figura) ed invia i messaggi visivi ed acustici quando sono raggiunti i punti di supervisione:



**Figura 32. Invito a decelerare per il macchinista prima che la Permitted speed inizi a diminuire**

I messaggi di supervisione ETCS hanno come principale scopo quello di invitare il macchinista a mantenere la velocità quanto più prossima alla Permitted speed, ma comunque è previsto che se questo non accade (per distrazione o malessere del macchinista) si susseguano dapprima un ulteriore messaggio di allarme e quindi il comando della frenatura.



**Figura 33. Superamento della Permitted speed e messaggio di Warning**

Come mostrato in figura 32, se, nonostante il messaggio di indication, il macchinista non inizi a decelerare viene inviato un nuovo messaggio (questa volta di warning), le curve di SBI e di EBD garantiscono comunque l'arresto in sicurezza.

Il modello per il calcolo delle curve di frenatura ETCS e le funzionalità di supervision ed intervention in tempo reale necessitano di numerosi dati di input. Questi possono essere classificati in quattro categorie:

- Parametri fisici (*Physical parameters*), che il computer di bordo ricava in tempo reale attraverso misurazioni (posizione, velocità ed accelerazione);
- Valori fissati da standard (*Fixed values*), che sono dei valori fissati dalla norma ETCS e sono sostanzialmente parametri ergonomici del modello della curva di frenatura (ad esempio i tempi di reazione del macchinista);
- Dati relativi al sottosistema di terra (*Trackside data*), essi sono i dati relativi al segnalamento (come ad esempio la velocità e la posizione obiettivo), i dati geometrici del tracciato (pendenze, curvature) ed i cd. *National Values*. I valori del SST sono fissati dal Gestore Infrastruttura e sono trasmessi al bordo ETCS mediante le Eurobalises;
- Parametri relativi al sottosistema di bordo (*On board parameters*), che sono i dati relativi al materiale rotabile (parametri fisici e prestazioni frenanti) e sono acquisiti ad ogni inizio missione.

Al fine di garantire che il convoglio sia realmente in grado di frenare rispettando la curva deterministica EBD prevista dal computer di bordo sono introdotti una serie di coefficienti correttivi ("correction factors").

Lo scopo fondamentale del modello di frenatura ETCS consiste nel trasformare le prestazioni frenanti di un veicolo in profili di decelerazione funzione del tempo, dello spazio e della velocità del veicolo.

In generale, lo standard ETCS (GROUP, 2014), definisce la curva EBD come una curva di tipo parabolico in funzione dello tempo. Tuttavia, essa è calcolata per punti con un modello analitico applicato a ritroso (“backward”) cioè a partire dalla posizione obiettivo (target position) e dalla velocità obiettivo (target speed).

Il modello per il calcolo della curva si basa sulle leggi del moto uniformemente accelerato; in particolare, la relazione della velocità in funzione dello spazio risulta:

$$v(d) = \sqrt{v(d_0)^2 - 2 \cdot a \cdot (d - d_0)}$$

$$v(t) = v(t_0) - a \cdot (t - t_0)$$

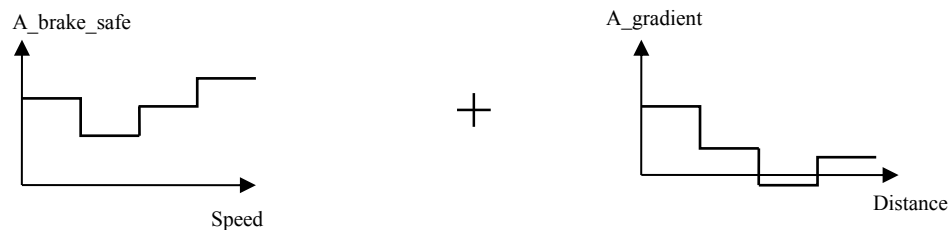
in cui  $v(d_0)$  è la velocità iniziale,  $d_0$  la posizione iniziale,  $a$  è la decelerazione e  $(d - d_0)$  è la distanza in cui l’accelerazione può assumersi costante.

Il valore di decelerazione è costituito da due aliquote:

- la decelerazione di emergenza garantita dal sistema frenante  $A\_brake\_safe$ ;
- la decelerazione indotta dall’eventuale pendenza del tracciato,  $A\_gradient$ .

$A\_brake\_safe$  è funzione del tipo di freni di cui è dotato il veicolo e della velocità; dal momento che solo il freno pneumatico è considerato sicuro, lo standard ETCS prevede che la distanza di arresto debba essere garantita considerando solo il contributo di questo freno; dimostrato che accade ciò possono aggiungersi i contributi anche dei cosiddetti freni speciali. La decelerazione di emergenza garantita dal sistema frenante è modellata come una funzione a scalino rispetto alla velocità.

$A\_gradient$  dipende, invece, dalla posizione, dalla lunghezza e dalla massa equivalente del convoglio. La decelerazione indotta dall’eventuale pendenza del tracciato è modellata come una funzione a scalino rispetto alla distanza.

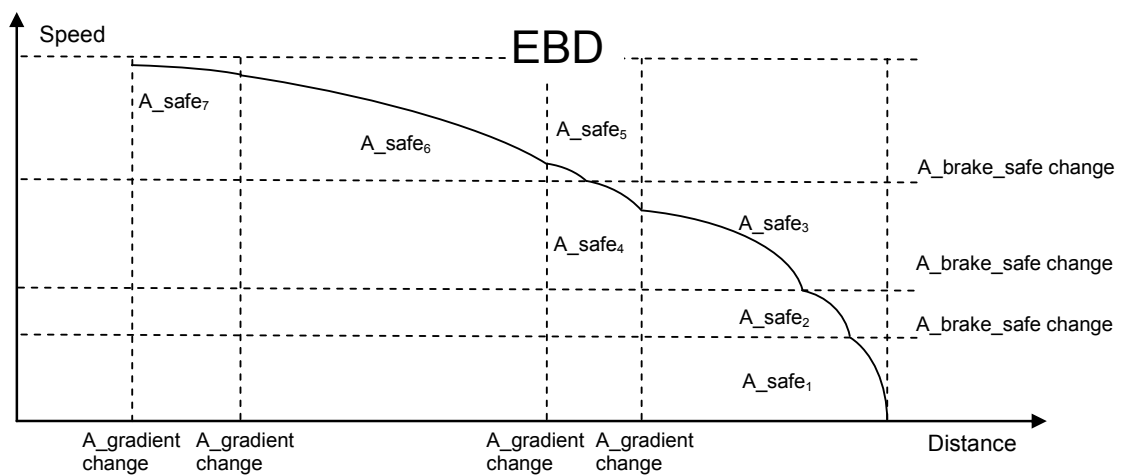


**Figura 34. Funzioni a scalino delle aliquote della decelerazione di emergenza**

La somma algebrica di questi due contributi fornisce il valore totale di decelerazione da usare per la curva EBD e definito  $A_{safe}$ :

$$A_{safe}(v, d) = A_{brake\_safe}(v) + A_{gradient}(d)$$

Nella seguente figura è mostrato l'involuppo dei punti calcolati con il modello appena descritto:



**Figura 35. Involuppo dei punti della curva di Emergency Braking Deceleration (*EBD curve*)**

La decelerazione di emergenza garantita dal sistema frenante cioè la  $A_{brake\_safe}$  viene calcolata applicando dei coefficienti correttivi alla decelerazione di emergenza nominale definita  $A_{brake\_emergency}$ . Tali coefficienti servono a correggere il valore nominale a vantaggio di sicurezza cioè considerando la dispersione dei valori dei parametri prestazionali dell'apparato frenante.

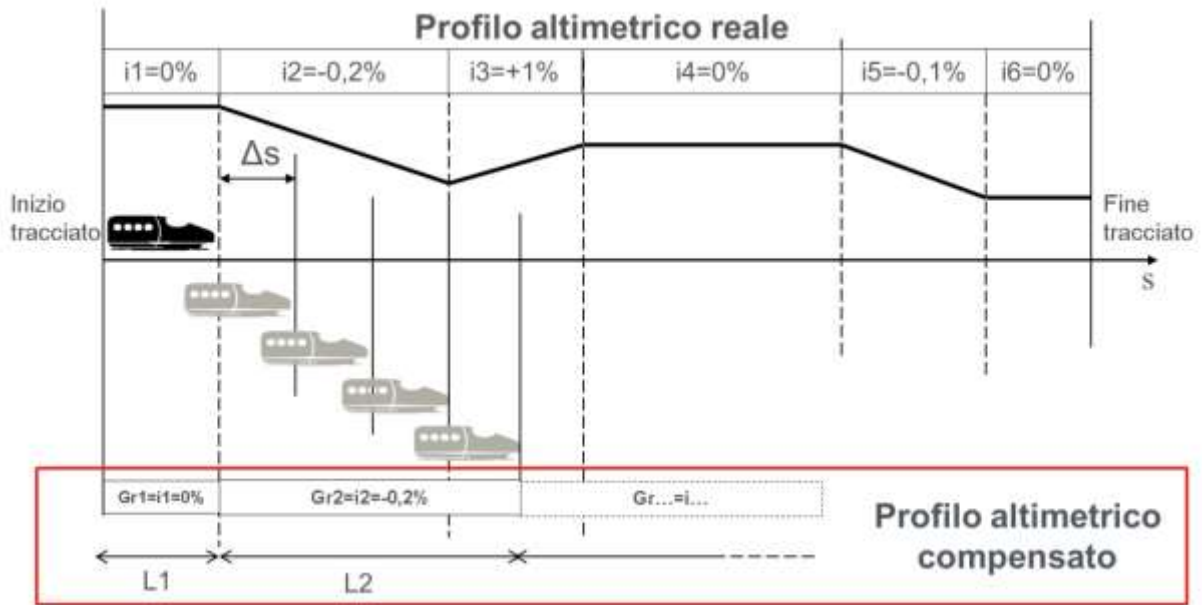
Quindi, dal momento che le prestazioni di un apparato frenante hanno un comportamento aleatorio e la distanza di arresto è notevolmente influenzata dalle condizioni ambientali contingenti tali fattori correttivi sono utilizzati per gestire l'incertezza delle variabili di ingresso dei modelli a vantaggio di sicurezza.

Per il calcolo dell'aliquota di decelerazione indotta dalla pendenza del tracciato lo standard ETCS definisce due modelli:

- *Train lenght compensation;*

- *Rotating mass compensation.*

Il modello di train length compensation è utilizzato per costruire un nuovo profilo delle pendenze che consideri sempre la pendenza più sfavorevole per la frenatura (cioè in discesa) che il convoglio attraversa con l'intera sua lunghezza. L'output del modello consiste in un profilo altimetrico con livellette modificate:



**Figura 36. Compensazione del profilo altimetrico del tracciato in funzione della lunghezza del convoglio**

Per considerare, inoltre, la forza di inerzia dovuta alle variazioni di accelerazione indotte dalla pendenza il modello utilizza la massa equivalente ottenuta moltiplicando la massa statica del convoglio per il coefficiente delle masse rotanti. In definitiva, risulta:

$$A_{gradient}(d) = g \cdot grad \cdot M_{rotating}$$

in cui

$g$  è l'accelerazione di gravità;

$grad$  è la pendenza compensata dalla lunghezza del convoglio;

$M_{rotating}$  è il coefficiente delle masse rotanti.

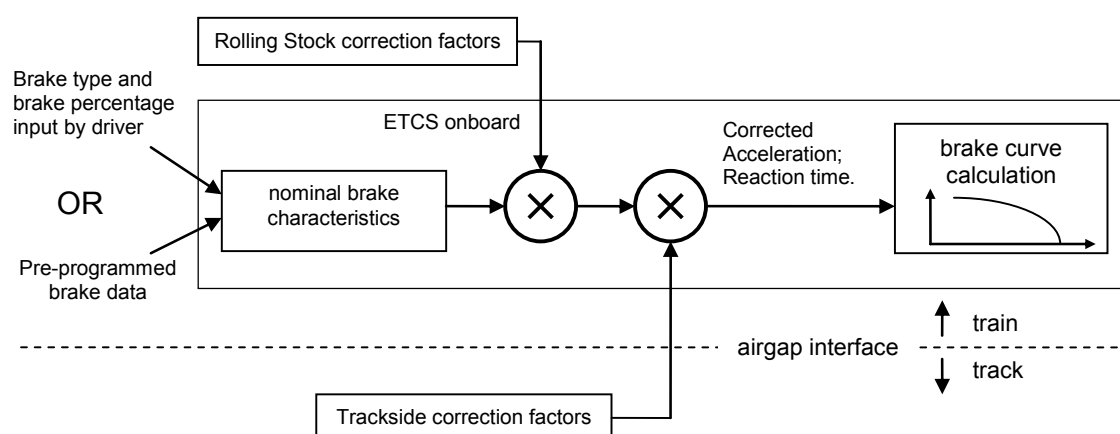
Per il calcolo dell'aliquota di decelerazione fornita dall'apparato frenante, invece, lo standard ETCS definisce due diversi modelli di frenatura (cd. *braking models*) il cui output consiste nel profilo  $A_{brake\_safe}=A_{brake\_safe}(v)$ .

Infatti, i parametri riferiti al materiale rotabile che sono necessari a calcolare il profilo di decelerazione non possono essere fissati sempre a priori. Si pensi, ad esempio, al caso dei convogli a composizione variabile. Per tale ragione, lo standard ETCS definisce due tipologie di modelli di frenatura riferiti rispettivamente ai cosiddetti:

- *Gamma trains* cioè veicoli a composizione fissa o con un numero predefinito di possibili composizioni;
- *Lambda trains* cioè veicoli con composizione variabile.

Nel caso di gamma train ad ogni inizio missione tutti i parametri ed i coefficienti correttivi sono acquisiti dal computer di bordo come dati di ingresso (in quanto già preconfigurati o inseriti manualmente dal macchinista).

Nel caso, invece, di lambda gli unici parametri utilizzati come dati di ingresso dal computer di bordo ETCS sono la percentuale di massa frenata del convoglio e la sua lunghezza. Tali valori sono inseriti manualmente dal macchinista.



**Figura 37. Schema a blocchi dei dati di scambio tra sottosistema ETCS di terra e sottosistema ETCS di bordo per il calcolo della curva di frenatura di emergenza (EBD curve)**

#### 2.4.4.2 Il modello di frenatura per i treni a composizione fissata (Gamma train braking model)

I dati di ingresso al modello di frenatura per un convoglio del tipo “gamma” sono:

- caratteristiche fisiche del convoglio: tipo convoglio (passeggeri o merci), massa, lunghezza, coefficiente nominale delle masse rotanti ;
- caratteristiche dell'apparato frenante: tipi di freno (pneumatico/elettropneumatico, elettrodinamico, ecc.), posizione della leva freno (modalità Passeggeri o modalità Merci), ritardi del sistema pneumatico;



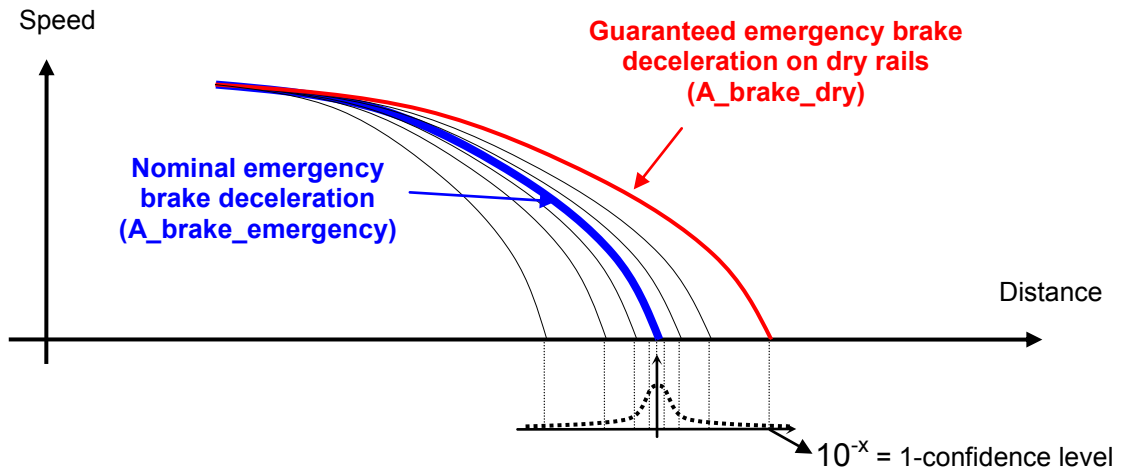
- tempi di percezione e reazione del macchinista (valori fissati da standard ETCS);
- errore tollerato per il sistema odometrico (misurazione della velocità del veicolo);
- pendenza del tracciato;
- parametri relativi al sottosistema di terra: livello di confidenza per il valore nominale della decelerazione di emergenza, coefficienti correttivi inerenti le condizioni di aderenza;
- coefficienti correttivi relativi al materiale rotabile.

I coefficienti correttivi relativi al materiale rotabile sono inferiori all'unità e sono utilizzati per gestire l'incertezza delle prestazioni frenanti del veicolo in caso di rotaie asciutte e bagnate. Fissato, infatti, un certo livello di confidenza, per esempio 0,99, si assume che con una probabilità del 99% la decelerazione fornita dai freni sia maggiore del valore  $A_{brake\_emergency} \times \text{coeff.correttivo}$  dove  $A_{brake\_emergency}$  è il valore nominale di decelerazione cioè il valore atteso.

Il modello definisce, in particolare, due coefficienti:

- $K_{dry\_rst}$ , coefficiente relativo al materiale rotabile ("rolling stock") per quantificare la dispersione del valore di decelerazione su rotaie asciutte ("dry").
- $K_{wet\_rst}$ , coefficiente relativo al materiale rotabile ("rolling stock") per quantificare la dispersione del valore di decelerazione su rotaie bagnate ("wet").

In sintesi, lo scopo di tali coefficienti correttivi è quello di sottostimare la decelerazione garantita (o sovrastimare la distanza di arresto) a vantaggio di sicurezza; come mostrato nella seguente figura, il valore  $A_{brake\_dry} = A_{brake\_emergency} \times K_{dry\_rst}$  realizza la distanza di arresto maggiore rispetto a tutti gli altri valori o, analogamente, rappresenta il valore minimo di decelerazione possibile:



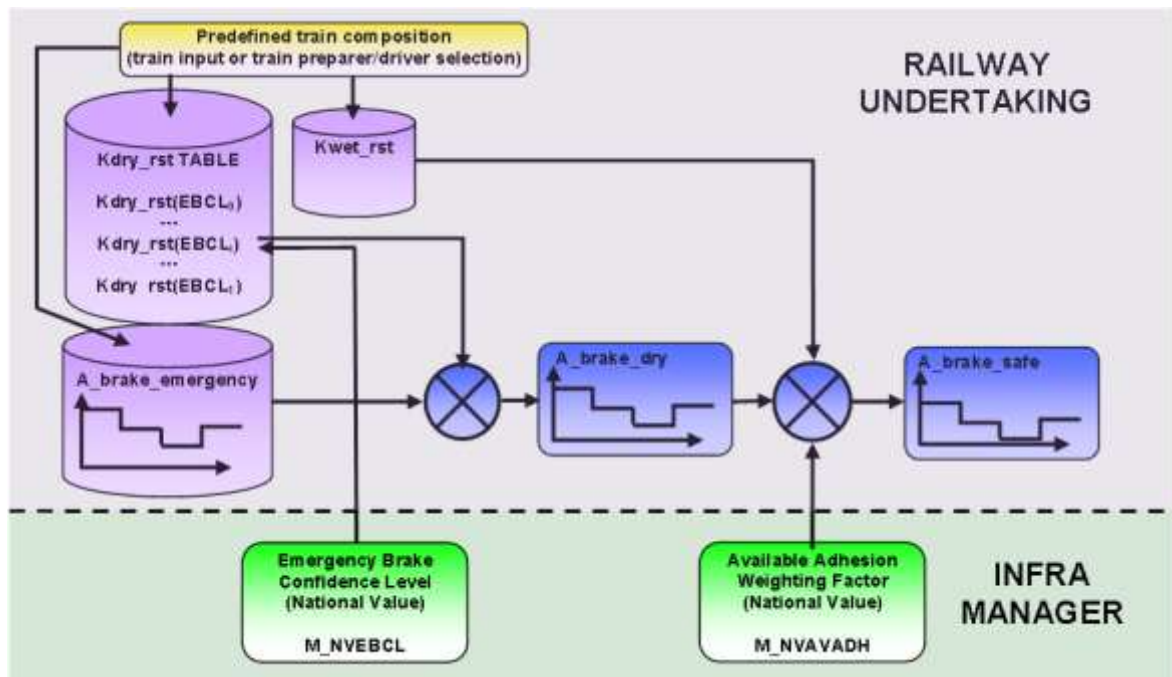
**Figura 38. Dispersione del valore di decelerazione su rotaie asciutte**

Se il convoglio è del tipo “gamma”, la decelerazione da assumere nel modello della curva EBD risulta pari a:

$$A_{brake\_safe} = A_{brake\_emergency} \cdot K_{dry_{rst}}(M_{NVEBCL}) \cdot [K_{wet_{rst}} + M_{NVAVADH} \cdot (1 - K_{wet_{rst}})]$$

dove  $M_{NVEBCL}$  è il livello di confidenza fissato dal Gestore Infrastruttura per il valore della decelerazione nominale e  $M_{NVAVADH}$  un parametro fissato dal Gestore Infrastruttura e funzione delle condizioni di aderenza sull'infrastruttura (quindi funzione della progressiva). Ottenuta  $A_{brake\_safe}$  si può calcolare la decelerazione globale come:

$$A_{safe}(v, d) = A_{brake\_safe}(v) + A_{gradient}(d)$$



**Figura 39. Schema a blocchi dei dati di scambio nel modello di frenatura per treni a composizione fissata (*Gamma train braking model*)**

#### 2.4.4.3 Il modello di frenatura per i treni a composizione variabile (*Lambda train braking model*)

Nel caso di convogli per i quali non è possibile stabilire a priori la composizione, i dati di ingresso necessari al modello di frenatura sono:

- caratteristiche fisiche del convoglio: tipo convoglio (passeggeri o merci), massa, lunghezza, coefficiente nominale delle masse rotanti, percentuale di massa frenata ;
- caratteristiche dell'apparato frenante: tipi di freno (pneumatico/elettropneumatico, elettrodinamico, ecc.), posizione della leva freno (modalità Passeggeri o modalità Merci), ritardi del sistema pneumatico;
- tempi di percezione e reazione del macchinista (valori fissati da standard ETCS);
- errore tollerato per il sistema odometrico (misurazione della velocità del veicolo);
- pendenza del tracciato;
- coefficienti correttivi globali definiti dal Gestore Infrastruttura definiti in funzione del tipo di convoglio (passeggeri o merci) e della lunghezza del convoglio.

I coefficienti correttivi globali sono applicati per consentire al GI di adattare le curve di frenatura ETCS al sistema di segnalamento presente sulla linea. Infatti, per un dato valore di percentuale di massa frenata  $\lambda$  (parametro riferito al materiale rotabile e, quindi, di competenza del Gestore Trasporto), il GI può adattare la forma della curva EBD in funzione del tipo di apparato frenante del materiale rotabile circolante. Di conseguenza, l'affidabilità della curva EBD varia da treno a treno e, quindi, i coefficienti correttivi globali devono essere quelli definiti per il convoglio con le prestazioni frenanti peggiori.

Il modello di frenatura per un treno del tipo “lambda” ha un dominio di validità così definito:

- velocità massima  $\leq 200$  km/h;
- $30 \% \leq \lambda \leq 250 \%$  ;
- lunghezza massima convoglio passeggeri se il freno è in modalità “Passeggeri”= 900 m;
- lunghezza massima convoglio merci = 1500 m;

Per i convogli passeggeri convenzionali (treni a lunga percorrenza e regionali) il Gestore Infrastruttura ha la facoltà di scegliere uno o l'altro modello di frenatura; infatti, il sottosistema di bordo ETCS può essere configurato in modo da settare uno o l'altro modello.

Se il convoglio è del tipo “lambda”, la decelerazione da assumere nel modello della curva EBD risulta pari a:

$$A_{brake\_tuned}(v) = A_{brake,converted}(\lambda, v) \cdot K_{v_{int}}(Train\ type) \cdot K_{r_{int}}(L_{train})$$

e, quindi:

$$A_{safe}(v, d) = A_{brake\_safe}(v) + A_{gradient}(d) = A_{brake\_tuned}(v) + A_{gradient}(d)$$

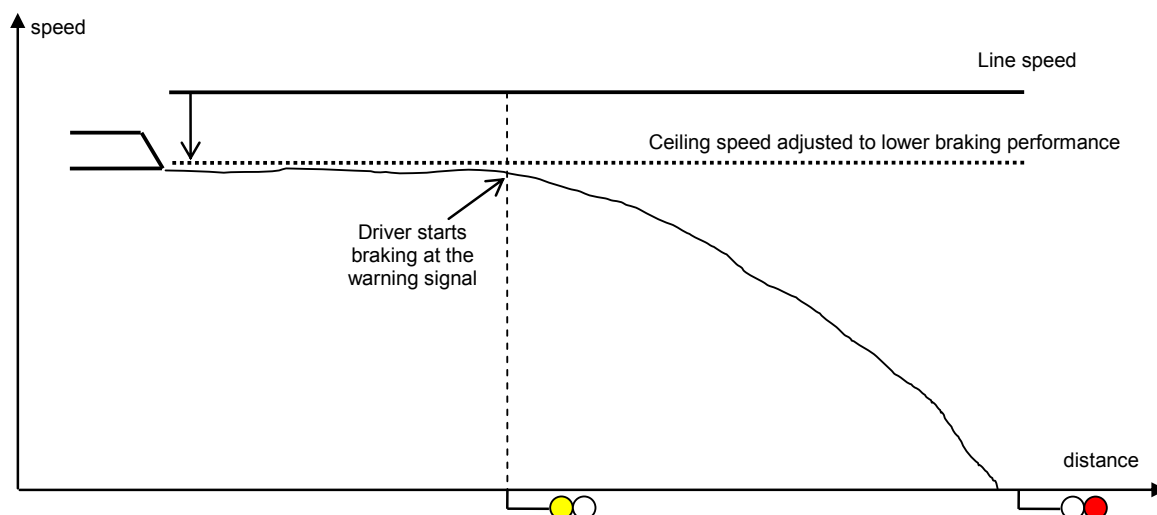
#### 2.4.4.4 Impatto delle curve di frenatura ETCS sull'headway di linea

Sulle linee con distanziamento a blocco fisso ed ATP privo di cab signalling la guida dei veicoli è realizzata osservando i segnali luminosi di linea. In tal caso, il segnalamento è multi aspetto con almeno tre diversi aspetti: prima di ogni segnale principale è sempre posizionato un segnale secondario di modo che la sequenza degli aspetti sia rosso-giallo-verde.

Un segnale giallo, allora, equivale per il macchinista al comando di inizio frenatura e, pertanto, deve essere posizionato in modo da fornire al macchinista il tempo necessario ad attuare il comando. Il layout delle sezioni di blocco è definito in funzione della categoria prevalente di materiale rotabile circolante (o di quella con prestazioni frenanti peggiori) e delle pendenze del tracciato.

In genere, il comando di inizio frenatura (segnale giallo) è identico per tutti i tipi di treno mentre per i convogli con prestazioni frenanti peggiori che circolano su linee con sezioni di blocco progettate per convogli di categoria superiore vigono specifiche limitazioni di velocità .

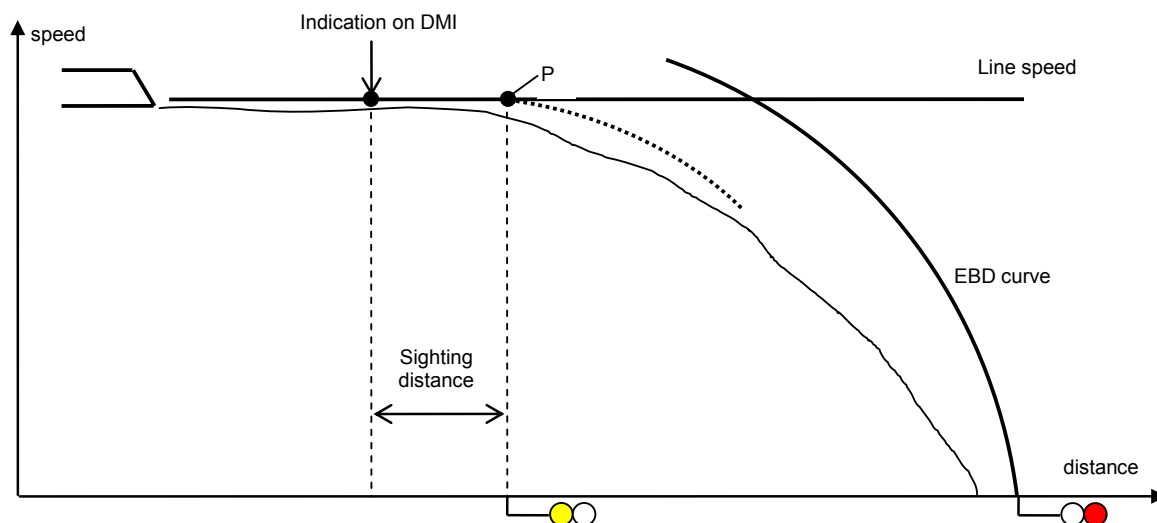
In poche parole, la guida con segnali luminosi implica che il punto in cui iniziare a frenare è fisso, mentre la velocità di inizio frenatura varia da convoglio a convoglio.



**Figura 40. ATP privo di cab signalling**

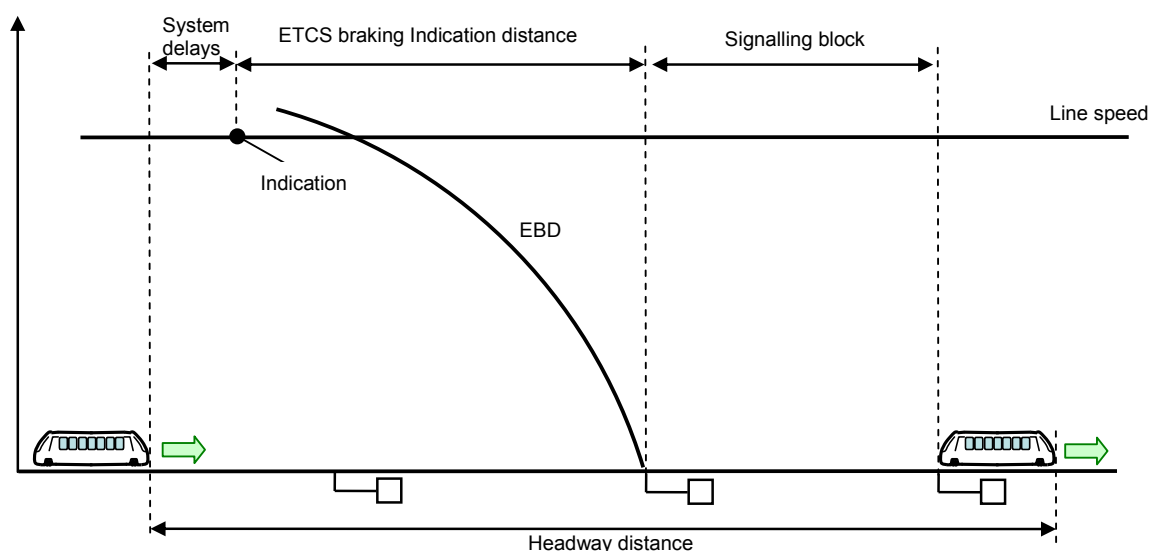
Con l'introduzione della funzione di cab signalling (ETCS Livello 1), invece, la logica è esattamente ribaltata: la velocità di inizio frenatura è fissa e pari a quella massima consentita sulla tratta, mentre il punto in cui iniziare a frenare è definito in funzione delle prestazioni frenanti del convoglio.

Ciò significa che il punto di supervisione *Indication* corrisponde alla distanza di visibilità del segnale giallo ed il punto di supervisione *Permitted* corrisponde alla posizione del segnale giallo:



**Figura 41. Corrispondenza tra i punti di supervisione ETCS ed il segnalamento a tra aspetti**

Grazie a questa logica, il sistema ETCS si presta ad essere implementato anche su linee con sezioni di blocco preesistenti, garantendo comunque una riduzione dell'headway per effetto della riduzione dei tempi di percorrenza delle sezioni di blocco: dal momento che ciascun convoglio elabora la propria curva di frenatura ed il proprio punto di arresto la velocità di marcia tenderà sempre a quella massima imposta dai vincoli statici:



**Figura 42. Impatto della curva di frenatura EBD sull'headway di linea**

### **3 Il segnalamento ferroviario: principi e tecnologie**

*Il presente capitolo descrive i concetti fondamentali della sicurezza della circolazione ferroviaria intesa come il complesso processo di interazione tra i convogli circolanti su una stessa linea. La sicurezza della circolazione così definita è garantita attraverso procedure, regole e componenti tecnologiche grazie alle quali vengono svolte tutte quelle operazioni che rendono possibile l'esercizio del trasporto ferroviario in condizioni ordinarie, in caso di guasti e di disturbi esogeni rispetto al sistema. Il presente capitolo è strutturato in quattro parti: nella prima sono descritte le principali problematiche connesse alla gestione del traffico ferroviario sia in piena linea che in ambito stazione; nella seconda i diversi tipi di "blocco" e le relative componenti tecnologiche impiegate; nella terza l'organizzazione della dirigenza del traffico in funzione del tipo di segnalamento presente su una linea; nella quarta, infine, sono descritti i tipi di segnalamento ferroviario per linee tradizionali, metropolitane e ad Alta Velocità.*

#### **3.1 Principi generali di sicurezza del traffico ferroviario**

La prima spontanea associazione che nasce quando si pensa alla sicurezza nel trasporto ferroviario come in ogni altro sistema di trasporto è quella tra incidenti e loro conseguenze in termini di morti e feriti. Sicuramente gli incidenti ferroviari, come quelli aerei, sono caratterizzati da una vera e propria spettacolarità, enfatizzata anche dai media, con immagini del post incidente che perdurano nella memoria dell'opinione pubblica a distanza anche di molti anni. Il tutto aggravato dalla consapevolezza di ognuno, utente abitudinario o meno, di poter trovarsi su quel treno, quel giorno a quell'ora.

A prescindere di chi o di quale impianto sia la responsabilità dell'incidente, anche se accertata, l'opinione pubblica tende a colpevolizzare sempre l'azienda di trasporto con una conseguente ripercussione in termini di immagine. Motivo per il quale ieri come oggi il tema della sicurezza dell'esercizio è una costante, un aspetto curato quotidianamente, con piccole e continue attività di controllo e verifica.

Quando ci si addentra nell'ambito della Sicurezza della circolazione ogni considerazione deve essere fatta avendo sempre come riferimento, ieri come oggi, tre fattori fondamentali che costituiscono i tre livelli nei quali si opera per garantirla:

- tecnologie;
- regole;
- uomo.

Senza voler essere assolutamente riduttivi, si può affermare che il progresso nell'ambito della sicurezza si basi proprio sul diverso peso attribuito a ciascuno di questi fattori.

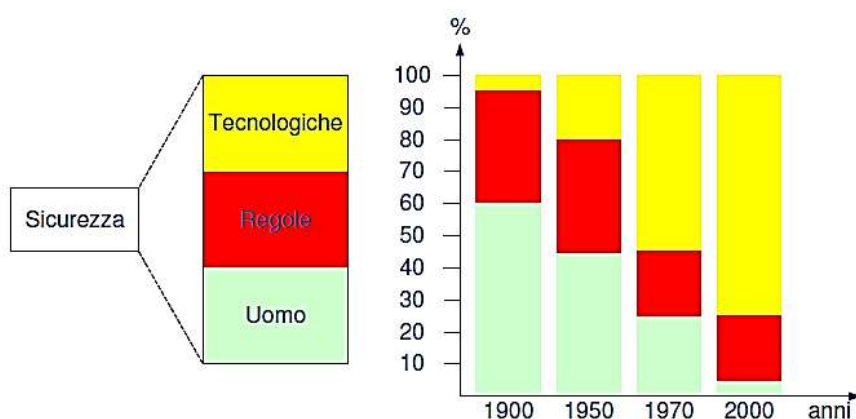
Infatti, alla nascita del trasporto ferroviario la sicurezza è sostanzialmente affidata alle competenze ed alla diligenza dell'operato umano non essendo disponibili tecnologie in grado di sostituirsi ad esso: la presenza di molti operatori comporta un campo infinito di scelte che ciascun individuo può effettuare e, quindi, la necessità di stabilire molte e complesse regole. Infatti, il sistema ferroviario è il primo ad aver raggiunto valori di velocità ed affollamento tali da rendere indispensabile stabilire e rispettare rigorose norme di sicurezza.

Con il progresso tecnologico, gli impianti hanno iniziato ad essere in grado di svolgere sempre più mansioni, sia manuali che intellettuali e ciò ha consentito da una lato di inglobare gran parte delle regole e procedure all'interno delle tecnologie stesse, dall'altro di minimizzare il numero di operatori necessari e gli effetti di ogni errore possibile di ciascuno di essi.

Vale la pena sottolineare che la crescente importanza e presenza delle tecnologie non ha comportato una riduzione delle regole e delle procedure, ma semplicemente un'inclusione di alcune di queste nella logica di funzionamento degli impianti stessi; in sostanza, sono diminuite quelle regole e quelle procedure per le quali gli operatori devono essere formati e che sono tenuti a rispettare.

Tuttavia, l'operato umano si pone sempre al centro del sistema della sicurezza ferroviaria: se gli standard tecnologici sono bassi l'uomo li integra con il suo operato; se gli standard tecnologici sono elevati l'uomo controlla gli impianti e si sostituisce ad essi in caso di guasto.

In figura è mostrato un istogramma dal quale si evince l'evoluzione del peso dei fattori della sicurezza nel tempo:



**Figura 43: Evoluzione dei fattori fondamentali della sicurezza nel tempo**

Sussiste un binomio indissolubile tra la *regolarità* della circolazione e la *sicurezza* della circolazione.



La regolarità della circolazione consiste nel rispetto degli orari: un servizio ferroviario regolare è caratterizzato dal fatto che i ritardi siano un'eccezione rara del normale esercizio e non un accadimento cronico. Il giudizio sulla qualità del servizio reso al pubblico è influenzato in maniera predominante da questo aspetto, forse secondo solo alla percezione della pulizia degli ambienti dell'infrastruttura e del materiale rotabile.

La regolarità della circolazione è sia una necessità che una finalità nell'organizzazione del trasporto ferroviario. È una necessità in quanto la fitta rete di coincidenze tra treni di diverse linee dà per sicuro il rispetto degli orari cioè è possibile solo se la circolazione è regolare e, quindi, prevedibile. È una finalità, inoltre, in quanto il ritardo di un treno si ripercuote su tutta la linea, si pensi ad una linea a binario unico, e comporta spostamenti di incroci e precedenza che a loro volta costituiscono un'ulteriore perdita di tempo con riduzione della velocità commerciale e decadimento della qualità del servizio offerto, si pensi alle conseguenze che un ritardo può comportare ad utenti che effettuano spostamenti del tipo casa-lavoro.

Il binomio tra regolarità e sicurezza si basa sul fatto che procedure complicate per garantire la sicurezza, per loro natura o per assenza di tecnologie, vanno a discapito della regolarità cioè comportano perdite di tempo eccessive, mentre forti irregolarità di circolazione compromettono la sicurezza a causa del carattere di imprevedibilità che assume la circolazione stessa e all'aumento dell'operato umano in condizioni anomale di servizio (con aumento della probabilità di errore).

Proprio per l'esistenza di questo binomio, regolarità e sicurezza sono considerate dalle aziende di trasporto ferroviarie due facce della stessa medaglia e trattate una sempre con visione prospettica dell'altra.

Per convenzione concettuale in ogni sistema di trasporto si fa distinzione tra due gruppi distinti di condizioni di sicurezza definendo allora una:

- sicurezza del moto del singolo convoglio (convoglio isolato);
- sicurezza della circolazione di più convogli (interazione tra convogli).

L'approccio che si adotta quando si affronta la sicurezza del moto del singolo convoglio è quello di ipotizzare che sulla linea circoli un unico convoglio. Allora, la sua sicurezza scaturisce dalla sicurezza della via ferrata, dalla sicurezza dei veicoli che lo costituiscono e dall'efficienza del sistema di frenatura. In questo ambito si definisce, pertanto, *l'affidabilità del dispositivo* intesa come la probabilità che un convoglio svolga le funzioni per il quale è predisposto (trasportare passeggeri o merci, effettuare fermate e ripartenze) per un certo tempo ed in determinate condizioni.

La sicurezza del singolo convoglio è garantita dal controllo sia della via ferrata che del materiale rotabile; un controllo continuo è praticamente impossibile e viene, quindi, effettuato solo con periodicità sistematica dal personale addetto con ispezioni della sede viaria e dei binari giornaliere,

controlli ad ogni partenza del convoglio ed interventi di manutenzione in officina del materiale rotabile.

La sicurezza della circolazione di più convogli consiste, in sostanza, nel garantire che un convoglio sia inoltrato su di un determinato tratto di binario solo quando il tratto è libero da altri convogli e non sia interessato da manovre degli enti (deviatoi) che ne modificano la traiettoria con il convoglio in transito.

L'esistenza delle condizioni di libertà della via da percorrere (da altri convogli e da manovre) non può essere accertata direttamente dal conducente il convoglio a causa sia delle lunghe distanze di frenatura per le elevate velocità raggiunte che per l'impossibilità di scansare un ostacolo improvviso essendo tale sistema di trasporto a *guida vincolata*.

È, quindi, indispensabile che sia il personale a terra, che è a conoscenza della posizione degli altri convogli, ad accertare lo stato di libertà della via ed a darne informazione al conducente. Ed è allo stesso personale a terra che deve essere affidato il compito di impedire, sempre attraverso lo scambio di informazioni, che altri convogli o manovre si immettano sul binario su cui il convoglio considerato si sta muovendo.

Ebbene, lo scambio di informazioni tra conducente e personale di terra potrebbe avvenire prevedendo una fermata del convoglio in ogni punto in cui sia necessario ottenerle; in tal caso ogni informazione può essere scambiata a voce, o meglio ancora, a mezzo di documentazione scritta. Logicamente questo metodo di comunicazione è efficiente ma non efficace in quanto comporta perditempo connessi alle fermate ed allo scambio di informazioni. L'unico modo per evitare questi perditempo è ricorrere a *segnalazioni* ottiche ed acustiche con un linguaggio dei segnali preventivamente ed inequivocabilmente stabilito.

Nasce in tal modo una diretta correlazione tra il segnale che viene esposto al conducente il convoglio e le condizioni di libertà e sicurezza del binario da percorrere. Tale *collegamento* può essere sicuro con il solo operato umano e norme precise fissate nei regolamenti di esercizio, con l'operato umano e l'ausilio di impianti che facilitano i controlli o, infine, con impianti a funzionamento completamente automatico.

In base, allora, alla necessità di questo scambio di informazioni tra convoglio e terra che si delineano i due grandi sottosistemi della sicurezza della circolazione: il primo comprendente i regolamenti di esercizio secondo i criteri di sicurezza, il secondo comprendente la progettazione e la realizzazione degli impianti di sicurezza, per verificare le condizioni di sicurezza, e gli impianti di segnalamento, per trasmettere al conducente informazioni corrispondenti al vero.

In particolare, la progettazione degli impianti ferroviari di sicurezza e segnalamento si basa sulla cosiddetta tecnica *fail safe* che tradotto sta per *a prova di guasto*. Questa tecnica consiste, in sostanza, nel progettare un impianto, un'apparecchiatura o un singolo dispositivo in modo che sia

sempre data una risposta alla domanda “cosa accade se il dispositivo non funziona?”, o meglio, progettando in modo che la sicurezza sia comunque garantita anche se il dispositivo si guasta cioè sia sempre previsto “il piano B”!

L'esempio più semplice di applicazione di questa tecnica è quello dei circuiti elettrici utilizzati per disporre a via impedita un segnale per impedire l'ingresso di un altro convoglio su un tratto già occupato. Il circuito è strutturato in modo che circoli normalmente la corrente e venga interrotto quando il convoglio entra sul tratto di binario considerato: l'assenza di circolazione di corrente è la condizione per far scattare a via impedita il segnale. Se il circuito viene interrotto per cause esterne, ad esempio uno smottamento della sede viaria, la presenza di un elemento metallico sulle rotaie, ecc. il segnale scatta comunque a via impedita e può tornare a via libera solo con la rimozione della causa perturbatrice. In sostanza, la sicurezza è garantita dal fatto che i convogli comunque non vengono inoltrati nel tratto considerato, anche se in realtà libero.

È interessante, infine, descrivere il cuore del concetto di sicurezza ferroviaria: tanto più la circolazione su una linea è intensa cioè vi sono più convogli in simultaneo tanto più rischiosa è la circolazione stessa cioè più elevata la probabilità di interazione tra due convogli distinti, ben inteso che l'interazione comporta la collisione nella maggior parte dei casi in quanto la vista del convoglio che precede avviene in tempo non utile ad effettuare la frenatura senza collisione.

Ed allora, esiste una condizione di sicurezza assoluta anche in caso di guasto degli impianti di sicurezza e segnalamento: quella di convogli tutti fermi nella tratta interessata dal guasto. Pertanto, in tale settore non si ragiona in termini di sicurezza probabilistica cioè correlata alla probabilità di guasto durante un certo tempo di funzionamento in quanto esiste il *rischio zero*, ma si ragiona in termini di sicurezza sempre garantita: un qualsiasi guasto non comporta un rischio, ma solo il passaggio ad una situazione di maggiore sicurezza con circolazione meno intensa.

L'interazione di più convogli in linea o in una stazione origina diverse problematiche che possono essere raggruppate in base a tre distinte matrici di derivazione:

- per le linee a binario singolo, la matrice di una serie di problematiche è costituita dal *distanziamento dei convogli* che si susseguono e dalla *regolazione degli incroci* per i convogli circolanti in senso opposto;
- per le linee sia a doppio che a singolo binario, la matrice di una serie di problematiche è costituita dalla regolazione delle *precedenze* per i convogli circolanti nello stesso senso o in senso opposto;
- per le stazioni, la matrice di una serie di problematiche è l'organizzazione del movimento dei diversi convogli provenienti dalle varie linee.

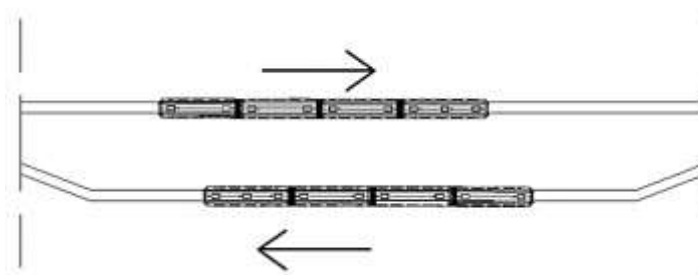
Distanziamento dei convogli, incroci e precedenze sono definiti nel linguaggio tecnico ferroviario *operazioni di circolazione*.

Il *distanziamento dei convogli* che si susseguono su uno stesso binario è una matrice che nasce dalle caratteristiche del sistema stesso di trasporto cioè dalla caratteristica di essere un sistema a guida vincolata ed in cui non è possibile effettuare una marcia cosiddetta *a vista*. Pertanto, nel tempo sono stati studiati ed attuati una serie di sistemi per distanziare i convogli in modo da garantire sempre una distanza spaziale pari almeno a quella necessaria per l'arresto del convoglio che segue.

Nel seguente capitolo è ampiamente trattata questa problematica ed è descritta l'evoluzione nel tempo dei *sistemi di circolazione* a partire dalla nascita della ferrovia fino ad oggi.

Un *incrocio* è un'operazione di circolazione che viene sempre svolta in ambito stazione (come sarà chiaro in seguito sono proprio le operazioni di circolazione e di servizio possibili che consentono di distinguere le diverse infrastrutture areali ferroviarie in *stazioni, fermate e posti movimento*) e si rende necessaria ogni qual volta si debba disciplinare l'inoltro dei convogli in senso opposto su una linea a singolo binario.

Tale operazione prevede che un convoglio soste su un apposito binario laterale, detto anche *binario di incrocio*, al fine di liberare la via, detta anche *binario di corsa*, per consentire il transito del convoglio in senso opposto.



**Figura 44: Incrocio**

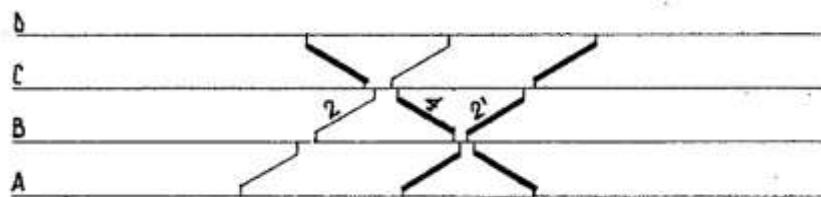
La sede di incrocio, cioè la stazione o il posto movimento dotata di binario laterale, è stabilita nell'Orario di servizio.

Nel caso in cui tutti i treni della linea rispettino l'Orario, cioè non vi siano ritardi, sono note le sedi di incrocio ed il convoglio che vi giunge prima viene ricevuto di regola sul binario laterale e posto in sosta nel frattempo che giunga e transiti il convoglio in senso opposto.

Il problema sorge quando i treni non rispettano l'orario, situazione che si verifica molto frequentemente. In questo caso è necessario, allora, modificare la sede dell'incrocio rispetto a quella prevista dall'Orario e questa operazione molto delicata viene svolta del personale delle stazioni. Gli operatori della stazione sede di incrocio in base all'orario devono ottenere informazioni circa il ritardo di ogni convoglio che circola sulla linea, contattando il personale delle

altre stazioni ed in base a tali informazioni devono stabilire le nuove sedi di incrocio (molto probabilmente variando una sede di incrocio a catena si determina una variazione anche delle altre previste). Tale scambio di comunicazioni viene eseguito in base a precise formule stabilite dal Regolamento di esercizio; una volta stabilita la nuova sede di incrocio, viene impartito l'ordine ai convogli interessati.

In figura è mostrato un esempio di modifica della sede di incrocio dalla stazione C a B:



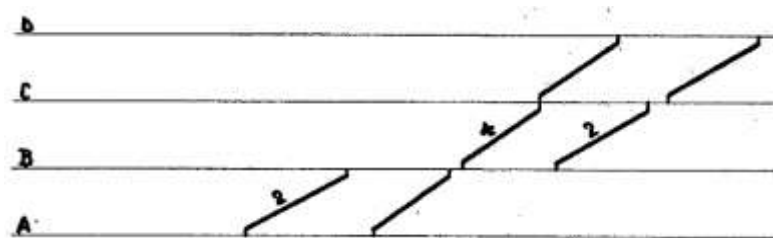
**Figura 45: Modifica della sede di incrocio dalla località C a B**

Le tre tracce costituiscono tre diversi treni: due diretti da A verso D ed uno diretto da D verso A. In base all'Orario i treni 2 e 4 devono incrociarsi nella stazione C, ma siccome il treno 2 parte in ritardo dalla stazione A, diventando di fatto il treno 2', ed il treno 4 parte in orario, la sede deve essere spostata in B come risulta dall'intersezione delle due rispettive tracce (la pendenza di ciascuna spezzata è la velocità di avanzamento del convoglio).

Una *precedenza* è un'operazione di circolazione che permette il sorpasso di un convoglio da parte di un altro più veloce. Le precedenze, pertanto, riguardano i treni che marciano sullo stesso binario e nello stesso verso. È un'operazione possibile solo nelle stazioni provviste di binari laterali.

Se prevista dall'Orario di servizio la precedenza è definita *normale*, se invece è dettata da esigenze causate da ritardi dei treni ed avviene, quindi, in una stazione dove non era prevista, è definita *anormale*.

In figura è mostrata una precedenza normale nella stazione B del treno 4, più veloce, sul treno 2, più lento:



**Figura 46: Precedenza normale in B del treno 4 sul treno 2**

La circolazione dei convogli in una stazione, invece, risulta molto più complessa di quella in piena linea a causa delle caratteristiche infrastrutturali e funzionali della località di servizio. Pertanto, anche il numero delle fasi caratteristiche da svolgere per garantire la sicurezza cresce in ragione della maggiore possibilità di movimento di ciascun convoglio e della possibilità di movimenti contemporanei di più convogli.

È necessario, come fatto per la circolazione in piena linea, descrivere queste fasi in quanto sono le fondamenta su cui si erige la sicurezza stessa della circolazione in stazione indipendentemente se questa sia affidata al solo operato umano o ad impianti di sicurezza e segnalamento più o meno automatici.

#### Fase I) Formazione dell'itinerario

Si definisce *itinerario* il percorso di un convoglio nell'ambito di una stazione. Per formazione dell'itinerario si intende, quindi, la creazione del percorso disponendo i deviatori in corretto tracciato o in deviato a seconda della strada che il convoglio deve percorrere.

#### Fase II) Fermascambiatura (o assicurazione dei deviatori) e controllo

Dopo aver manovrato i deviatori, è necessario controllare che ciascun deviatoio abbia raggiunto la posizione voluta e, successivamente, effettuare la fermascambiatura cioè un'operazione manuale o telecomandata che garantisce che il deviatoio rimanga nella posizione voluta e non possa scostarsene a causa degli scuotimenti e degli urti provocati dal passaggio del convoglio. Quindi, bisogna verificare che sia avvenuta la fermascambiatura.

#### Fase III) Verifica della incompatibilità con altre vie

La verifica della incompatibilità con altre vie consiste nell'accertamento che non siano stati formati itinerari *incompatibili* cioè percorsi che possano provocare la collisione tra convogli ed assicurare che non ne possano essere formati alcuni successivamente. Se la conformazione del piazzale non consente di escludere in assoluto l'incompatibilità tra itinerari bisogna assumere la certezza che i segnali che danno il via libera sugli altri itinerari incompatibili con quello formato siano e permangano a via impedita.

#### Fase IV) Verifica della libertà della tratta di via

Naturalmente è necessario accertarsi che non siano già presenti altri convogli, eventualmente fermi, sull'itinerario formato.

#### Fase V) Disposizione a via libera del segnale che immette nell'itinerario e bloccamento itinerario

Effettuate le fasi di verifica dell'itinerario, si dispone a via libera il segnale di istradamento sull'itinerario e simultaneamente l'itinerario viene bloccato cioè i tratti di binario che lo compongono non possono essere utilizzati per formare altri itinerari né i deviatori da questo impegnati possono essere manovrati fin quando non è stato completamente attraversato dal

convoglio che ha ricevuto il via libera. Il bloccamento dell'itinerario svolge due funzioni di sicurezza: da un lato impedisce che due convogli possano collidere perché instradati su percorsi che condividono stessi tratti di binario, dall'altro impedisce che il convoglio instradato dal via libera possa trovarsi a percorrere un itinerario diverso da quello per il quale aveva ricevuto il via libera, perché sono stati nuovamente manovrati i deviatori, e magari percorrere il nuovo itinerario ad una velocità superiore a quella adeguata al nuovo itinerario (il macchinista non riesce a percepire in tempo utile a regolare la marcia del treno il cambiamento dell'itinerario).

#### Fase VI) Occupazione del segnale di partenza

Il segnale di partenza deve tornare a via impedita appena il convoglio è stato instradato sull'itinerario per evitare che possa essere recepito da un altro convoglio intempestivamente.

#### Fase VII) Liberazione dell'itinerario

Allorquando il convoglio ha percorso completamente l'itinerario esso possono essere nuovamente manovrati i suoi deviatori ed i suoi tratti di binario impegnati per altri itinerari.

Nell'ambito di un piazzale di stazione si distinguono due famiglie di movimenti che possono avvenire:

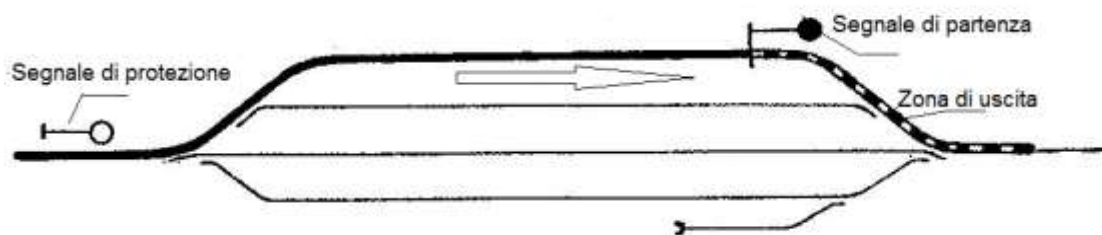
- movimenti di treni;
- movimenti di manovra.

I movimenti di treni sono comandati da segnali di protezione della stazione e segnali di partenza e sono a loro volta distinti in:

- arrivo di un treno, che si svolge lungo un itinerario di arrivo;
- partenza di un treno, che si svolge lungo un itinerario di partenza;
- transito di un treno, che si svolge attraverso un itinerario composto da quello di arrivo e da quello di partenza.

Il segnale di protezione di una stazione è sempre normalmente posto a via impedita la sicurezza della circolazione nel piazzale si basa anche sul concetto di richiesta ed autorizzazione a percorrere l'itinerario di arrivo. Il segnale di partenza è anch'esso sempre posto a via impedita ed il suo aspetto cambia solo dopo che sono state verificate le condizioni di sicurezza relative all'itinerario di partenza ed all'istradamento in piena linea (cioè libertà della sezione di blocco successiva a quella della stazione).

A vantaggio di sicurezza è previsto sempre un tratto di binario libero sul prolungamento dell'itinerario di arrivo nell'eventualità che il convoglio non riesca a fermarsi entro il punto terminale dell'itinerario; tale tratto è definito *zona di uscita*.



**Figura 47: Itinerario di arrivo e zona di uscita**

I movimenti di manovra generalmente si svolgono completamente nell'ambito del piazzale e sono movimenti necessari per le attività di manutenzione e di composizione e scomposizione dei convogli. Questi movimenti possono essere controllati e coordinati solo da operatori oppure da un impianto di telecomando e telecontrollo: nel primo caso sono impegnati operatori *manovratori* che comandano a mezzo di segnali a mano e *deviatori* addetti alla manovra dei deviatori, nel secondo caso sono impiantati sul piazzale dei segnali fissi appositi per le manovre definiti *segnali bassi*, in gergo chiamati anche *marmotte*. I tratti di binario da percorrere per una manovra costituiscono quello che più propriamente viene definito *istradamento* per distinguerlo dall'itinerario che, invece, è utilizzato per i movimenti treni ed ha lunghezza superiore e velocità di marcia superiori. Siccome l'istradamento raramente è percorso da convogli adibiti al trasporto viaggiatori e le velocità sono molto basse, non superiori ai 30 km/h, non è necessario né il bloccamento né la liberazione e per disporre il segnale basso a via libera è necessario e sufficiente che siano posizionati, controllati e fermascambiati i deviatori.

### **3.2 Il distanziamento dei veicoli in sicurezza: tipi di blocco**

Nel precedente paragrafo si sono affrontati in linea generale le problematiche della sicurezza della circolazione e si è più volte sottolineato come nel trasporto ferroviario vi sia la necessità di uno scambio di informazioni tra il conducente il convoglio ed il personale di terra. Lo scambio di informazioni è realizzato a mezzo di segnali dal significato predefinito ed inequivocabile.

I *segnali fissi* sono così indicati in quanto impiantati stabilmente in determinati punti della linea e possono essere distinti in segnali ad aspetto fisso, denominati *tabelle*, e segnali ad aspetto variabile che, generalmente, sono segnali luminosi.

La nascita dei *segnali fissi luminosi* è dovuta alla necessità di poter gestire l'ingresso e la partenza dei convogli dalle stazioni.



In particolare, dalla pratica dell'esercizio ferroviario, emerge sin dai tempi più remoti la necessità di poter usufruire di, per questi denominati fissi, e che possano essere azionati a distanza cioè dai locali della stazione. In tal modo, infatti, l'operatore può decidere quando sia il momento idoneo per consentire ad un convoglio, proveniente dalla piena linea, di entrare in stazione occupandone i deviatoli: tale decisione si traduce nella cosiddetta disposizione a *via libera* del segnale, generalmente coincidente con l'aspetto di colore verde. In ragione della funzione svolta da tale segnale lo si definisce *segnale di protezione della stazione*.

Successivamente, nasce l'istanza di poter disporre di un segnale fisso per comandare la partenza di un convoglio fermo in stazione, nasce cioè il cosiddetto *segnale di partenza*.

Sicuramente un'altra informazione importante da destinare al conducente è il segnale di via libera che assume per questi il significato che è stato preventivamente accertato lo stato di libertà da altri convogli e da manovre della tratta che egli si accinge a percorrere.

Per tale funzione, si distinguono due sistemi di segnalamento mediante segnalali ad aspetto variabile:

- Segnalamento a due aspetti;
- Segnalamento a tre aspetti.

Nel segnalamento a due aspetti ciascun segnale può assumere due aspetti (verde o rosso) che corrispondono ai due stati di libertà o occupazione del tratto di binario successivo.

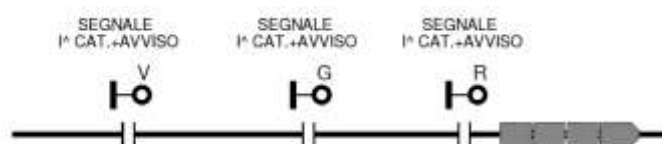
All'inizio di ogni tratto di binario è disposto al lato sinistro del macchinista nel senso di marcia un *segnale di protezione* o *segnale di I categoria* così definito proprio perché posto a protezione del tratto a valle: non appena il convoglio occupa il tratto in esame il segnale di protezione ad esso relativo passa dall'aspetto verde a quello rosso che permane fino a quando il tratto non torna ad essere nuovamente libero.

Prima del segnale di protezione è posto un *segnale di avviso* che informa il macchinista sull'aspetto del segnale di protezione successivo. Il segnale di avviso può assumere anch'esso due aspetti: verde se il successivo segnale di protezione è verde, giallo se il successivo segnale di protezione è rosso. Segnale di avviso e segnale di protezione sono disposti ad una distanza pari almeno allo spazio di arresto: se il macchinista percepisce il segnale di avviso giallo è informato che il successivo segnale di protezione è rosso e che, quindi, deve arrestare il convoglio prima di oltrepassare il segnale di protezione.



**Figura 48: Segnalamento a due aspetti**

Nel segnalamento a tre aspetti ogni segnale luminoso può assumere aspetto verde, giallo o rosso. Si ricorre a questo sistema di segnalamento quando si hanno tratti di binario di piccola lunghezza, generalmente creati per aumentare la potenzialità della linea, che comportano un aumento della densità di segnali lungo la linea. L'infittirsi dei segnali rende più conveniente adottare segnali a tre aspetti che svolgono sia la funzione di segnali di avviso che quella di segnali di protezione. La distanza tra ogni segnale è pari sempre almeno allo spazio di arresto.



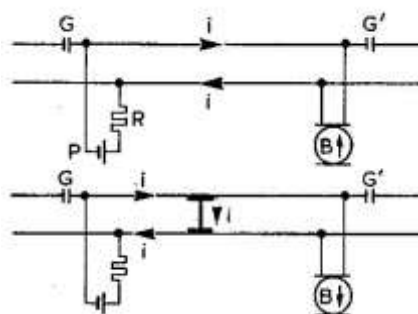
**Figura 49: Segnalamento a tre aspetti**

L'accertamento della via libera di un tratto di binario può essere fatto controllando l'uscita dei convogli dal tratto in esame da parte dell'operatore di terra che lo comunica successivamente all'operatore della stazione da cui il convoglio è partito.

Il dispositivo di campagna che consente, invece, di realizzare questo accertamento in modo automatico è il *circuito di binario*. Tale dispositivo serve per verificare la presenza o meno di un convoglio su di un certo tratto di binario e non consente di poter ricavare l'esatta posizione del convoglio sul tratto.

Rimandando a testi specifici per una trattazione dettagliata, ci si limita in questa a dare una descrizione schematica del dispositivo.

Un circuito di binario è un circuito elettrico in parte costituito dalle due rotaie del tratto di binario da controllare; il circuito è alimentato da un estremo con un generatore di forza elettromotrice ( $P$ ) ed è collegato all'altro estremo ad un relè ( $B$ ).



**Figura 50: Circuito di binario**

In figura il tratto di binario controllato dal circuito è compreso tra i due punti  $G$  e  $G'$  in cui sono montati dei *giunti isolanti* cioè due sconnessioni elettriche ma non meccaniche dei due tratti di rotaia. Se sul tratto controllato non è presente alcun convoglio, la corrente può circolare liberamente nel circuito partendo da  $P$  e giungendo al relè che è, quindi, alimentato o meglio *eccitato*. Appena il primo asse di un convoglio entra nel tratto cortocircuita l'alimentazione ed impedisce che la corrente giunga al relè che è disalimentato in questo caso cioè *diseccitato*.

Il circuito è anche dotato di una resistenza  $R$  che ha la funzione di limitare la corrente erogata dall'alimentazione  $P$  quando un asse cortocircuita il circuito.

Inserendo i contatti del relè  $B$  in altri circuiti è possibile collegare elettricamente un segnale fisso luminoso che assumerà in automatico l'aspetto a via libera se il circuito a valle è libero cioè il relè è eccitato, a via impedita se il relè è diseccitato.

La deficienza di tale dispositivo consiste nell'incertezza che comunque permane sulla posizione effettiva del convoglio all'interno del tratto di binario controllato.

Per ovviare a ciò sono utilizzate apparecchiature che accertano il transito di un convoglio attraverso un determinato punto della linea definite *pedali*. Queste apparecchiature sono installate singolarmente su di una rotaia del binario e sono azionate dalla ruota di un convoglio in transito. In base a dove viene installato il pedale si ottiene l'informazione puntuale della posizione del convoglio.

A valle di questa breve panoramica sui principali dispositivi utilizzati per il distanziamento dei convogli cioè per applicare il cosiddetto “blocco”, è possibile dare una definizione esaustiva di *sistema di circolazione* : esso è costituito da un modo di effettuare il distanziamento tra i convogli in piena linea e da un sistema di blocco.

Il *distanziamento dei convogli* che percorrono lo stesso binario è uno dei problemi fondamentali affrontati dalla Tecnica della Circolazione ferroviaria. Tale problema deriva dalla natura stessa del sistema di trasporto ferroviario quale *sistema a guida vincolata* : la guida del veicolo non è svolta dal conducente, cioè dal macchinista, ma è imposta dalla via ferrata. Inoltre, ciascun macchinista regola la marcia del proprio convoglio in base ad una serie di informazioni recepite e/o trasmesse da terra a bordo; la marcia non è effettuata “a vista”, come nel sistema di trasporto stradale, cioè il convoglio avanza ad una velocità tale da non poter fermarsi in uno spazio di arresto pari o inferiore alla distanza di visuale libera.

Pertanto, l'interazione tra più convogli che marciano su uno stesso binario e nello stesso verso deve essere gestita da una logica indipendente dalla possibilità di decisione del personale di bordo e che garantisca il distanziamento tra convogli per una circolazione sicura.

La circolazione in linea può avvenire secondo diversi regimi di circolazione:

- Regime chiuso, definito anche di *linea normalmente bloccata* e si basa sulla logica di richiesta e rilascio del consenso per istradare un convoglio da un posto di blocco ad un altro. In tale logica ogni sezione di blocco è bloccata cioè ne è impedito l'accesso e liberata solo dopo il rilascio del consenso cioè del *via libera*;
- Regime aperto, definito anche di *linea normalmente libera* e si basa su apparecchiature e tecnologie che chiedono e rilasciano il consenso istante per istante e consentono di predisporre ogni sezione a via libera e di occuparla solo quando attraversata da un convoglio;
- Regime a spola, prevede che su una linea sia in esercizio un solo mezzo di trazione per effettuare successivamente i treni nei due sensi di marcia. Sulla linea, pertanto, non possono avvenire né incroci né precedenza;
- Regime eccezionale di marcia a vista, regime applicato solo in particolari casi di emergenza con velocità dei convogli molto basse per consentirne l'arresto in sicurezza;

In generale, il distanziamento tra i convogli può essere attuato in diversi modi:

- Regime del bastone pilota;
- Distanziamento ad intervallo di tempo;
- Distanziamento ad intervallo di spazio.

Regime del bastone pilota.

La sicurezza della circolazione in linea di più convogli è ottenuta imponendo ad ogni treno<sup>1</sup> di portare a bordo da un posto di blocco al successivo o prendere visione alla partenza da un posto di blocco di uno stesso oggetto cioè il cosiddetto "bastone pilota".

La logica di sicurezza è applicata a ciascuna sezione in cui una linea è suddivisa ed ogni sezione è delimitata da due posti di movimento<sup>2</sup> o da due stazioni<sup>3</sup>. Ogni sezione ha un bastone pilota

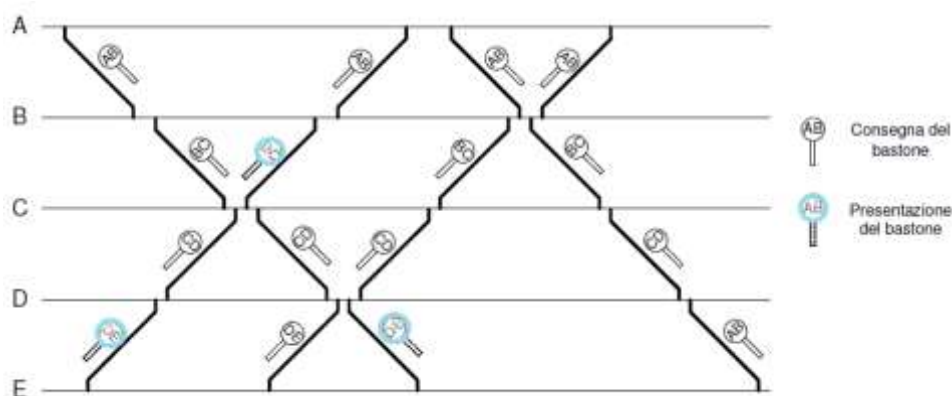
---

<sup>1</sup> Treno: termine con cui si indica la funzione spazio-tempo descritta nell'orario grafico e che differenzia da quella di *convoglio* con cui si indica l'ente fisico in movimento cioè il veicolo ferroviario. Uno stesso convoglio può originare diversi treni caratterizzati ciascuno da un istante di partenza da una località di servizio, uno di arrivo ad una successiva località e da una traiettoria.

<sup>2</sup> Posto di Movimento (PM): località di servizio, delimitata da segnali di protezione, adibita ad attività di circolazione (incroci, precedenza, ecc..) e non adibita al servizio pubblico. Una stazione può comprendere più posti di movimento.

caratteristico: ogni treno in partenza da un PM o stazione deve ricevere in consegna o prendere visione del bastone mostrato dall'operatore di terra corrispondente alla sezione in cui viene istradato.

La logica può essere meglio descritta prendendo in considerazione la seguente figura:



**Figura 51: Circolazione con bastone pilota**

In figura è mostrato l'orario grafico di una linea sulla quale è prevista la circolazione di quattro treni (due in direzione E-A e due in direzione A-E) attraverso cinque posti di blocco (PM o stazioni) indicati con le lettere dalla A alla E.

La procedura di sicurezza prevede che un treno riceva e trasporti a bordo il bastone pilota quando il treno successivo (in partenza o in arrivo alla stessa località) è di senso opposto; non riceve in consegna il bastone pilota, ma solo l'ordine di partire su presentazione del bastone dall'operatore di terra, quando il treno successivo è nello stesso senso.

Ad esempio, il primo treno in partenza dalla località di servizio A nel tratto A-B è obbligato a portare a bordo il bastone pilota specifico per questa tratta in quanto il successivo treno in A arriva in senso opposto, mentre il primo treno in partenza da E riceve il via libera solo con la presentazione del bastone specifico della tratta E-D in quanto, nella località E, il successivo treno è nello stesso verso cioè in partenza. Quest'ultimo, invece, riceve in consegna il bastone DE in quanto il successivo è di senso opposto.

---

<sup>3</sup> Stazione: località di servizio, delimitata da segnali di protezione, in cui si regola la circolazione dei convogli tramite incroci e/o precedenza e vengono espletati anche servizi commerciali di accesso al trasporto viaggiatori e/o merci.

La sicurezza della circolazione è garantita dalla condizione che il bastone non si trova nella stazione o PM verso il quale un convoglio sta dirigendosi e, pertanto, nessun convoglio può essere istradato dallo stesso PM in verso opposto.

Sicuramente tale procedura di sicurezza è affidabile, ma comporta dei tempi lunghi di svolgimento in quanto ogni treno, in ogni stazione o PM, deve arrestarsi o comunque rallentare per la consegna o la visione del bastone pilota. Tale regime di circolazione sarebbe inammissibile su linee ad elevata intensità di circolazione.

Tuttavia, il vantaggio di tale regime consiste nella possibilità di svolgimento anche in caso di guasto delle telecomunicazioni tra le varie stazioni.

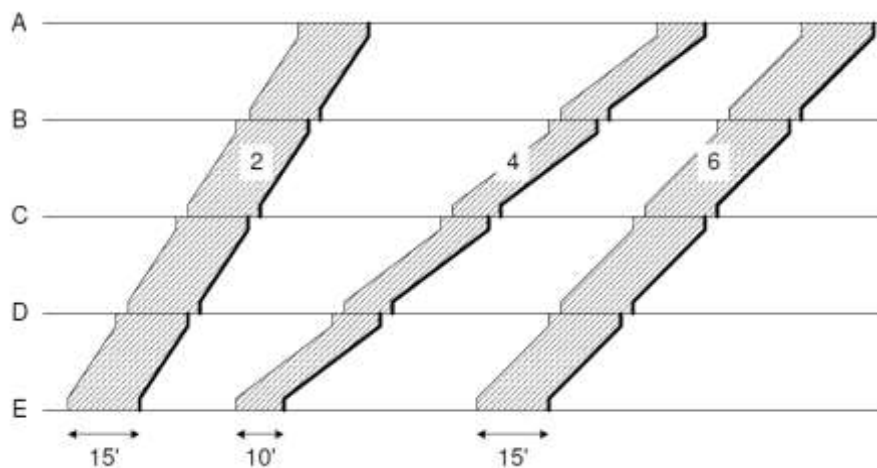
Il regime del bastone pilota ad oggi è stato abbandonato da tutte le reti europee, è ancora attuato in alcune ferrovie dell’Africa e del Sud-Est Asiatico. Nell’Europa continentale è ancora previsto solo nel caso di guasto delle telecomunicazioni sulle linee a binario unico.

#### Distanziamento ad intervallo di tempo

La logica di sicurezza sulla quale si basa tale modo di distanziamento dei treni prevede che le stazioni ed i posti di guardia<sup>4</sup> in linea debbano rispettare un intervallo di tempo prestabilito a partire dal transito dell’ultimo treno prima di inviare il successivo. L’intervallo di tempo è pari a quello di normale percorrenza del primo treno fino alla stazione successiva incrementato di un certo margine di sicurezza. Inoltre, vigono una serie di misure di sicurezza per i convogli fermi in linea o ai segnali di protezione delle stazioni per guasti: il personale di bordo ha obbligo di *proteggere la coda del convoglio* attraverso l’esposizione di segnali a mano a congrua distanza.

---

<sup>4</sup> Posto di Guardia (PdG): località di servizio presidiata da un agente che ha in carico la manovra dei passaggi a livello.



**Figura 52: Circolazione con distanziamento ad intervallo di tempo**

In Italia tale modo è stato abolito nel 1923; vigeva un intervallo di 10 minuti tra i treni con velocità non superiore ai 50 km/h e di 15 minuti tra quelli con velocità pari o superiore ai 50 km/h..

È una logica che non consente di recuperare eventuali ritardi; infatti, ogni treno che parte da una stazione vincola la percorrenza del successivo che non può variare la propria velocità di marcia fino a quando il treno precedente non è giunto alla stazione successiva.

Come è intuitivo dedurre tale modo diventa dispendioso in termini di velocità commerciali e meno sicuro per linee con intensità di circolazione elevata: infatti, la logica di sicurezza si basa sul rispetto della regolarità di circolazione dei treni e quindi anche degli incroci e delle precedenzae aspetto che, al contrario, è causa proprio della necessità di ricorrere agli impianti ed alle procedure di sicurezza. Cioè è proprio perché i treni non sono puntuali che nasce l'incertezza della sicurezza della circolazione e il ricorso ai sistemi ed alle logiche di sicurezza che non dipendano dal rispetto dell'orario di esercizio.

Ad oggi tale modalità di distanziamento è attuata solo in caso di emergenza cioè di guasto degli impianti di telecomunicazione ed il macchinista del convoglio successivo ad un altro inviato ha l'obbligo di assumere il regime di circolazione con marcia a vista.

#### Distanziamento ad intervallo di spazio

Il distanziamento ad intervallo di spazio fonda la propria logica di sicurezza nel vincolo del rispetto di un distanziamento spaziale tra due convogli successivi che marcano su uno stesso binario e nello stesso verso: il treno che precede (leader) deve aver abbandonato la tratta di binario prima che il treno che segue (follower) la impegni a sua volta. Tale modalità prevede la suddivisione della

linea in sezioni di blocco. Una sezione di blocco è delimitata da due Posti di Blocco<sup>5</sup> (PdB) cioè da due punti di distanziamento successivi tra i quali non può mai trovarsi più di un convoglio alla volta.

Per garantire la sicurezza della marcia di un convoglio tra un posto di blocco ed il successivo, cioè la sicurezza della circolazione in piena linea, deve essere svolta sempre una successione ordinata di fasi sia nel caso in cui la sicurezza sia affidata al solo intervento umano che in caso di presenza di impianti di sicurezza e segnalamento con diversi livelli di automatizzazione. Le fasi descritte di seguito sono valide sia per le linee a singolo binario che per quelle a doppio binario in quanto sono riferite a ciascuno dei binari eventualmente presenti e si riferiscono ad una tratta di linea compresa tra due stazioni A e B.

Fase I) Accertamento della *libertà della tratta di via* tra due stazioni successive.

Il DM della stazione da cui il convoglio deve partire (A) deve *licenziare* il treno cioè accertarsi che la tratta sia sgombera da altri convogli e per far questo ha la necessità di ottenere il *consenso* dal DM della stazione che deve *ricevere* il convoglio (B): infatti, la certezza della tratta libera è conseguita solo attraverso lo scambio di informazioni tra i due DM in quanto solo il DM della stazione B può assicurare che qualsiasi treno inoltrato in precedenza sulla tratta la abbia anche liberata interamente.

Fase II) Disposizione a via libera di un segnale di partenza.

Il macchinista del convoglio fermo alla stazione di partenza A riceve l'informazione che la tratta a valle è libera e che, dunque, può partire grazie ad un segnale di partenza posto a *via libera* e trasmessogli da terra.

Fase III) *Occupazione* del segnale di partenza.

Appena il convoglio partito dalla stazione A entra nella tratta di percorrenza, il segnale di partenza deve tornare alla posizione di *via impedita* per evitare che un secondo convoglio giunto nella stazione A possa inoltrarsi sulla stessa tratta.

Fase IV) *Bloccamento* della tratta di via.

Per tutta la durata di attraversamento della tratta del primo convoglio partito da A viene impedito che la stessa tratta possa essere considerata libera per un altro convoglio: il bloccamento consiste nell'imporre l'impossibilità al DM della stazione B di rilasciare un secondo consenso prima del tempo dovuto.

Fase V) *Liberazione* della tratta di via.

---

<sup>5</sup> Posto di Blocco (PdB): ogni località di servizio dedicata al distanziamento dei convogli.



Nel momento in cui il convoglio considerato ha liberato completamente la tratta viene annullato il bloccamento della stessa che può, quindi, essere utilizzata da un treno successivo.

Nel caso in cui il distanziamento tra i convogli sia basato su un intervallo di spazio, concettualmente ogni linea ferroviaria viene suddivisa in tratte di uguale lunghezza definite *sezioni di blocco* e vale l'assunto fondamentale che ogni sezione di blocco può essere occupata sempre da un solo convoglio. Le sezioni sono così definite in quanto al termine di ciascuna di esse il convoglio può essere arrestato, bloccato appunto, in attesa che si liberi la sezione di blocco successiva impegnata da un convoglio transitato precedentemente. La lunghezza di ciascuna sezione in generale è non inferiore allo spazio di frenatura.

Ogni linea ferroviaria può essere suddivisa in sezioni di blocco delimitate da *Posti di Blocco* cioè da località di servizio<sup>6</sup> in cui è possibile effettuare il distanziamento tra convogli cioè praticare il blocco.

La definizione di un *sistema di blocco* deriva dalla schematizzazione della linea mediante sezioni di blocco e, quindi, presuppone un distanziamento tra i convogli basato sull'intervallo di spazio. Un sistema di blocco è costituito da logiche di sicurezza e tecnologie che consentono di arrestare il convoglio al termine di una sezione ed impedire che transiti in quella successiva.

La teoria del blocco può, tuttavia, essere applicata anche se la linea ferroviaria non è suddivisa in sezioni di blocco così come intese tradizionalmente.

Il progresso nel settore delle tecnologie impiegate nel segnalamento ha consentito di perfezionare il meccanismo di blocco in linea ma, negli ultimi anni, gli studi si sono concentrati soprattutto su come eliminare completamente le sezioni di blocco.

Eliminare le sezioni di blocco ha l'enorme vantaggio di consentire la variazione della distanza tra i convogli in base alla velocità di marcia relativa. È come se si potesse riprodurre l'interazione longitudinale tra i veicoli stradali.

Non a caso la più diffusa classificazione dei tipi di blocco si basa proprio sulla esistenza o meno delle sezioni di blocco sulla linea. In base a tale criterio si distinguono:

- blocco fisso;
- blocco mobile.

Nel caso di distanziamento con blocco fisso, la linea è suddivisa in sezioni di blocco che possono essere *reali* se fisicamente delimitate dai segnali luminosi oppure *virtuali* nel caso in cui la linea sia

---

<sup>6</sup> Località di servizio: locuzione utilizzata per indicare in generale una località in cui vengono svolte attività connesse all'espletazione del servizio e/o della circolazione ferroviaria. Le località di servizio possono essere: stazioni, posti di movimento, fermate, bivio, posto di blocco intermedio. Un suo sinonimo è Posto di Servizio (PdS).

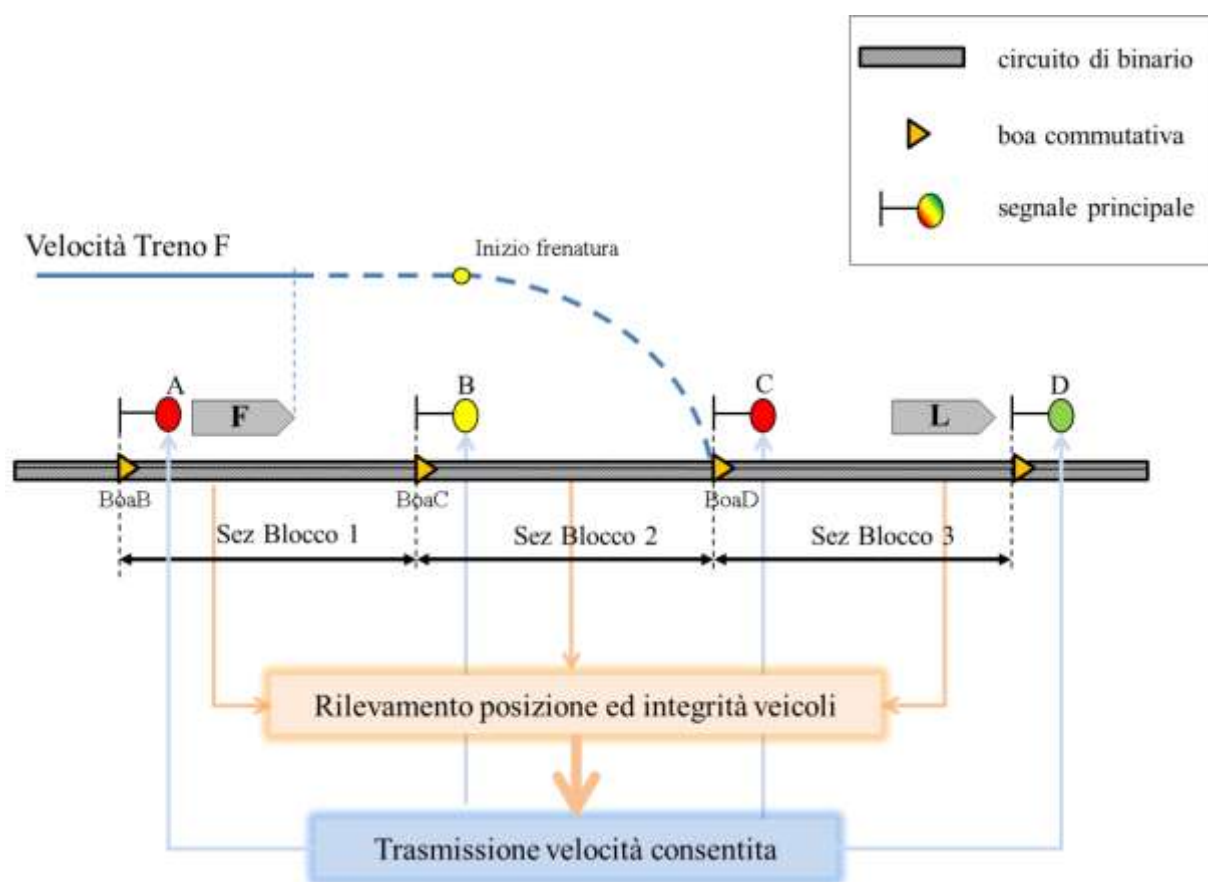
priva di segnali luminosi in quanto il sistema di segnalamento consente la trasmissione in cabina di guida del valore di velocità da attuare (cd. funzione di *cab signalling*).

Con tale tipo di blocco ciascun veicolo regola la propria marcia assumendo come punto di arresto il primo segnale rosso a valle.

Ciò significa che, come mostrato nella seguente figura, indipendentemente dalla effettiva posizione del veicolo leader, il punto di arresto per il veicolo follower coincide con il punto iniziale della sezione di blocco occupata dal leader.

Il distanziamento con blocco fisso può avvenire utilizzando una trasmissione delle informazioni da terra a bordo di tipo discontinuo nello spazio e di tipo continuo nello spazio.

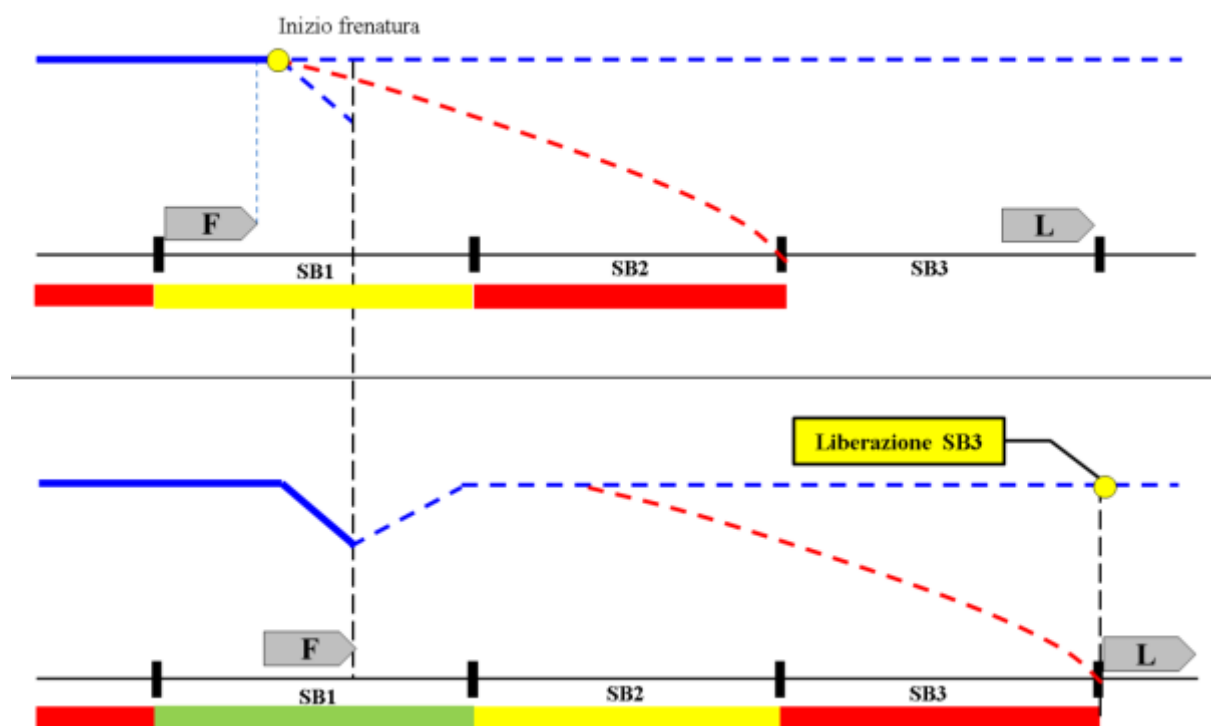
Nel caso di blocco fisso con trasmissione discontinua la velocità consentita nella sezione di blocco in cui il veicolo sta entrando viene trasmessa solo in alcuni punti della linea che consistono nei punti in cui sono posizionati i segnali luminosi. Se la linea è dotata di ripetizione in cabina del segnale, esempio mostrato nella seguente figura, vi sono dispositivi di campagna chiamati “boa commutative” che sono installati tra le rotaie e trasmettono al veicolo in transito l’aspetto del segnale luminoso a cui sono collegati.



**Figura 53: Distanziamento con blocco fisso e trasmissione discontinua**

Nel caso, invece, di blocco fisso con trasmissione continua la velocità consentita nella sezione di blocco in cui il veicolo sta entrando è trasmessa in modo continuo dello spazio attraverso circuiti di binario a correnti codificate oppure attraverso onde radio.

Il vantaggio sostanziale di una trasmissione continua consiste nel fatto che ciascun veicolo può regolare la marcia in base ad una informazione sulla posizione del leader aggiornata in tempo reale a meno di ritardi di trasmissione. Infatti, come mostrato nella seguente figura, non appena il veicolo leader libera la sezione di blocco 3, il follower può riprendere ad accelerare senza completare la manovra di arresto iniziata (cosa che accadrebbe, invece, se l'informazione sulla posizione del leader la potesse ricevere solo quando giunto presso il segnale di protezione della sezione 3).



**Figura 54: Distanziamento con blocco fisso e trasmissione continua**

Nel caso di distanziamento con blocco mobile, invece, la linea non è suddivisa in sezioni di blocco in quanto è possibile rilevare la posizione di ciascun veicolo in modo continuo nel tempo e nello spazio ed è possibile scambiare tali informazioni tra i veicoli in modo altrettanto continuo. Con tale tipo di blocco, che presuppone tecnologie di segnalamento molto evolute, ciascun veicolo regola la propria marcia assumendo come punto di arresto la posizione della coda del veicolo a valle.

Il distanziamento con blocco mobile si distingue in due tipi:

- blocco mobile assoluto (cd. *hard wall moving block*);
- blocco mobile relativo (cd. *soft wall moving block*).

Le attuali tecnologie disponibili consentono di realizzare solo il blocco mobile assoluto, ma la ricerca di settore è già proiettata verso il blocco mobile relativo in quanto i vincoli sono solo di natura tecnologica.

Nel con blocco mobile assoluto la distanza minima di sicurezza tra un veicolo leader un veicolo follower è calcolata supponendo che in un generico istante il leader si fermi esattamente dove si trova in quell'istante; ciò significa che il follower deve trovarsi ad una distanza di sicurezza dal leader pari almeno alla distanza di arresto per evitare la collisione.

Nel blocco mobile relativo, invece, la distanza minima di sicurezza tra un veicolo leader un veicolo follower è calcolata supponendo che in un generico istante il leader inizi a frenare fino all'arresto completo e che il follower a sua volta reagisca con una frenatura dopo un certo ritardo. Ciò significa che al limite la distanza di sicurezza debba essere pari almeno alla distanza percorsa durante il ritardo di reazione.

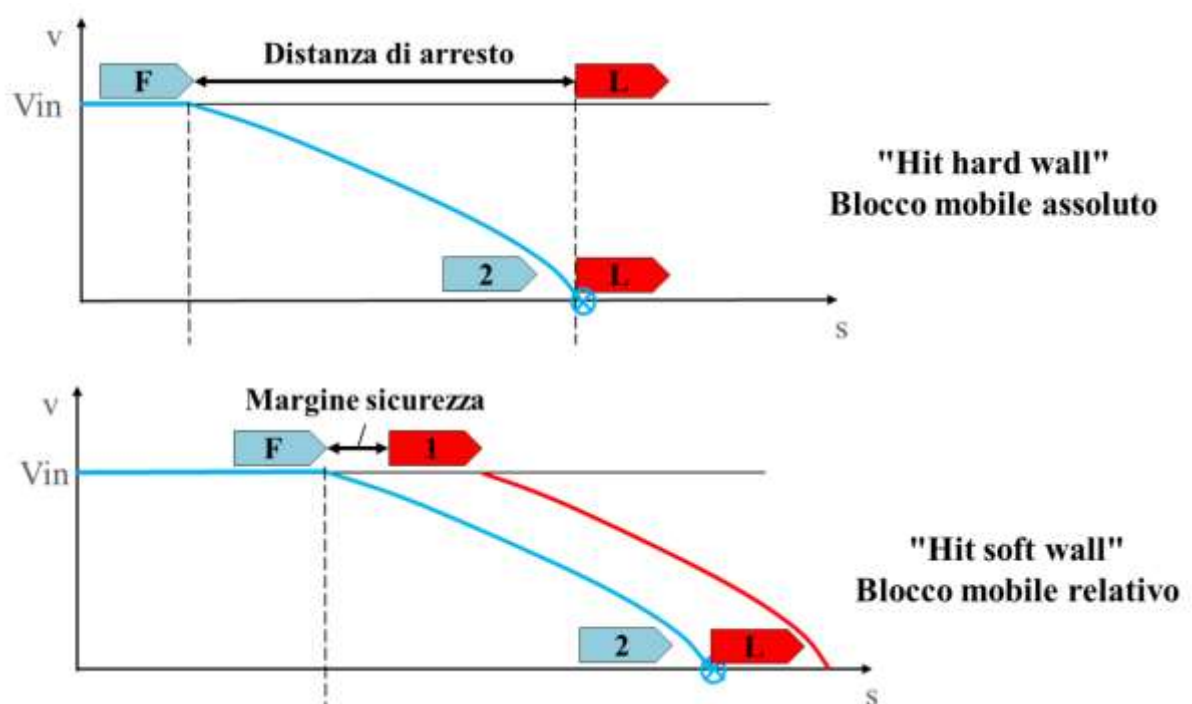
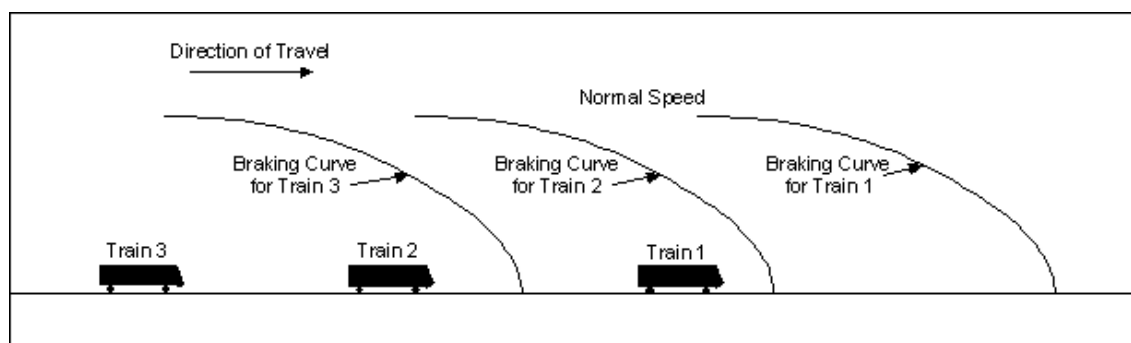


Figura 55: Tipi di blocco mobile

In sostanza, l'approccio soft wall assume che se due veicoli successivi viaggiano alla stessa velocità il veicolo follower può viaggiare ad una distanza dalla coda del leader pari solo ad un margine di sicurezza; infatti, se il veicolo leader inizia a frenare il follower ha a disposizione anche

la distanza percorsa dal leader in frenatura per frenare a sua volta. Sebbene gli innumerevoli incidenti autostradali smentiscano clamorosamente che questa logica sia sicura a causa dell'aleatorietà dell'effettivo valore della distanza di arresto (condizionata soprattutto dal comportamento umano), la guida automatizzata che è possibile realizzare nel trasporto ferroviario potrebbe rendere sicura anche questa logica di distanziamento.

Come mostrato nella seguente figura, fino a quando ciascun convoglio marcia alla stessa velocità di quello che lo precede e tutti i veicoli hanno le stesse prestazioni in frenatura, è possibile attuare un distanziamento spaziale di equilibrio pari ad un margine sicurezza dell'ordine di qualche decina di metri.



**Figura 56: Distanziamento minimo con blocco mobile relativo**

Gli effetti sulla capacità di linea di un distanziamento a blocco mobile relativo non sono stati ancora indagati in quanto il vincolo tecnologico rende non sicura la circolazione già con blocco mobile assoluto.

Tuttavia, è sicuramente possibile affermare che il passaggio al blocco mobile (sia esso assoluto o relativo) comporterà una sostanziale riduzione dei costi di gestione dell'infrastruttura. Infatti, il segnalamento sulle linee ferroviarie tradizionali presuppone un ammontare enorme di dispositivi di campagna che necessitano di energia di alimentazione e manutenzione costante in quanto esposti alle variazioni delle condizioni climatiche, all'usura, agli atti di vandalismo ed ai guasti fisiologici. A causa della loro installazione lungo la linea, la manutenzione è, quindi, molto costosa e spesso possibile solo quando i convogli non circolano. Inoltre, i guasti sono difficili da individuare e localizzare. Sulle linee metropolitane, inoltre, l'accesso ai binari è difficoltoso sia nei tratti sotterranei che in quelli sopraelevati.

Per questi ed altri motivi, uno degli obiettivi primari delle aziende trasportistiche è da sempre quello di ridurre al minimo l'attrezzatura di campagna per il segnalamento. Ridurre l'attrezzatura di campagna consente, inoltre, di contenere anche i costi di installazione.

Le tecnologie necessarie a realizzare il blocco mobile necessitano innanzitutto di minori dispositivi di campagna e quelli ancora necessari non richiedono energia di alimentazione si pensi, ad

esempio, alle cosiddette *boe fisse* cioè a quelle boe usate solo per la correzione degli errori odometrici che si attivano solo al passaggio del convoglio ferroviario.

L'approccio a blocco mobile assoluto prevede che la distanza minima di sicurezza tra due veicoli successivi sia pari a:

$$S_d = R_d + SBMD$$

dove

$R_d$  è la distanza percorsa durante i tempi di reazione del sottosistema di terra (frequenza di trasmissione delle informazioni dal treno leader al treno follower), del sottosistema di bordo (tempi di reazione dell'apparato frenante e del computer di bordo) e dalla velocità attuata;

$SBMD$  è la distanza di arresto calcolata con *full braking service deceleration* cioè con la massima decelerazione di servizio.

Pertanto, il blocco mobile assoluto garantisce che a valle di ciascun veicolo vi sia una distanza libera pari almeno alla distanza di arresto di servizio.

Invece, l'approccio a blocco mobile relativo prevede che la distanza minima di sicurezza tra due veicoli successivi sia pari a:

$$S_d = R_d + BMD_{Leader} - BMD_{Follower}$$

dove  $BMD_{Leader}$  è la distanza di arresto del veicolo leader e  $BMD_{Follower}$  quella del follower.

Gli aspetti critici di tale approccio che originano ancora molto scetticismo sulla adozione di tale blocco su reti reali consistono nel rischio relativo all'eventualità che il leader subisca un incidente arrestandosi pressappoco senza percorrere spazio (ad esempio un deragliamento di un convoglio sul binario di corsa di verso opposto) o che decelerati con un tasso inaspettato.

### 3.3 Impianti di segnalamento per la circolazione in piena linea

Nell'ambito della circolazione in piena linea si definiscono *impianti di blocco* gli apparati e le tecnologie che consentono di realizzare in modo più o meno automatico il blocco di ciascuna sezione di blocco in cui è suddivisa una linea.

La logica del distanziamento ad intervallo di spazio si diversifica leggermente nel caso in cui non sia presente un impianto di blocco o meno: nel primo caso, infatti, le sezioni di blocco sono delimitate da stazioni o PM, mentre nel secondo caso sono delimitate anche lungo la piena linea da *segnali fissi* cioè da segnali impiantati stabilmente in un determinato punto della linea.

In assenza di impianti di blocco sulle linee a singolo binario i posti di blocco sono posti di movimento o stazioni in cui ogni convoglio deve fermarsi e ricevere il consenso dal Dirigente Movimento<sup>7</sup> (DM) prima di potere riprendere la marcia. Su tali linee si verifica la necessità di poter effettuare incroci tra convogli che marciano in verso opposto e, pertanto, i PdB sono in genere costituiti da PM o stazioni.

In assenza di impianti di blocco sulle linee a doppio binario non banalizzate<sup>8</sup> un PdB può non coincidere con una stazione ed essere un cosiddetto *Posto di Blocco Intermedio* (PBI). Il PBI suddivide la tratta tra due stazioni in due tratte di minore lunghezza per ciascuna delle quali garantisce che non si possa trovare più di un convoglio alla volta.

Il PBI è presenziato da un Guardablocco che ha il compito di richiedere il via libera alla stazione successiva per poter inviare un convoglio, rilasciare il consenso di via libera alla stazione precedente e controllare la completezza di ogni convoglio giunto.

La presenza di un PBI è indispensabile quando la distanza tra due stazioni successive è notevole: riducendosi la lunghezza della tratta in cui deve trovarsi un solo convoglio alla volta aumenta da una lato la potenzialità<sup>9</sup> della linea, dall'altro riducendosi i tempi di attesa per la liberazione della tratta aumenta anche la velocità commerciale<sup>10</sup>. È possibile, inoltre, predisporre più PBI tra una stazione e la successiva.

Può verificarsi la presenza di PBI anche su linee a singolo binario, ma in tal caso i Guardablocco possono solo provvedere al distanziamento tra due convogli successivi nello stesso verso di marcia, mentre le condizioni di sicurezza per non inviare due convogli in senso opposto sulla tratta tra due stazioni devono essere sempre verificate dai DM delle stazioni e sotto la loro responsabilità.

---

<sup>7</sup> Dirigente Movimento (DM): operatore ferroviario di terra che regola ed è responsabile della circolazione dei convogli in una stazione che non è gestita altrimenti o con telecomando.

<sup>8</sup> Linea banalizzata: linea a doppio binario attrezzata con impianti di segnalamento che consentono la circolazione in entrambi i sensi di marcia su ciascun binario.

<sup>9</sup> Potenzialità: di un tratto di linea si intende il massimo numero di treni che vi possono circolare in uno specifico intervallo di tempo (per es. ora o giorno).

<sup>10</sup> Velocità commerciale: rapporto tra la distanza percorsa ed il tempo impiegato a percorrerla comprensivo di tutti i tempi accessori e le soste necessarie a completare il viaggio.



**Figura 57: Posto di Blocco Intermedio su una linea a singolo binario**

Nel caso in cui sia presente un impianto di blocco lungo la linea, ogni segnale fisso fornisce, in generale, indicazioni al macchinista circa lo stato di occupazione o libertà della sezione di blocco a valle: il macchinista regola la marcia del treno coerentemente con le informazioni ricevute dal segnale. Naturalmente, le informazioni relative all'arresto del convoglio o alla riduzione di velocità devono essere comunicate e recepite dal macchinista in tempo utile a consentirgli di attuarle in sicurezza.

Ogni sezione di blocco è sempre delimitata da due segnali fissi: ad un estremo si trova il cosiddetto *segnale di blocco* mentre all'altro si trova il cosiddetto *segnale di uscita*.

Il segnale di blocco è utilizzato per consentire o meno l'ingresso dei convogli nella sezione e *protegge* un convoglio una volta entrato garantendone l'esclusività durante la marcia lungo la sezione. Il segnale di blocco può coincidere eventualmente con il segnale di partenza di una stazione.

Il segnale di uscita, invece, è impiantato all'altro estremo della sezione di blocco: non appena il convoglio oltrepassa tale estremo il segnale di blocco della sezione, cioè quello presente all'estremo opposto, assume nuovamente l'aspetto di via libera ed un successivo convoglio può entrare nella sezione stessa. Il segnale di uscita può coincidere con il segnale di protezione di una stazione oppure può coincidere con il segnale di blocco della sezione successiva.

Le funzioni svolte da un impianto di blocco si riferiscono alle due fasi di *occupazione del segnale di partenza e liberazione* della tratta di via o sezione di blocco; infatti, l'impianto di blocco deve sia proteggere un convoglio che marcia nella sezione, cioè attuare il blocco non appena il convoglio supera il segnale di blocco, che occupare il segnale di partenza, cioè evitare che altro macchinista percepisca il segnale di via libera erroneamente. L'insieme di queste due funzioni viene indicato con la locuzione *occupazione della sezione* cioè una delle funzioni svolte dall'impianto di blocco è l'occupazione della sezione. Inoltre, l'impianto di blocco deve provvedere alla liberazione della sezione cioè alla riapertura del segnale di blocco quando il convoglio ha totalmente liberato la sezione.



Un impianto di blocco può svolgere o meno anche la cosiddetta attività di *accertamento della coda del treno* cioè al controllo che un convoglio sia transitato completo oltre un posto distanziatore: se l'impianto svolge solo le funzioni di occupazione della sezione e liberazione della sezione rende necessario che qualcuno accerti la coda del treno controllando che l'ultimo veicolo del convoglio abbia i segnali prescritti; se, invece, è dotato anche di un dispositivo che controlla che non esista più alcun asse tra il segnale di blocco e quello di uscita l'accertamento della coda del treno è svolto automaticamente dall'impianto stesso.

I diversi tipi di blocco che consentono di distanziare i veicoli possono essere classificati anche in base alle tecnologie impiegate.

Se si adotta questo criterio di classificazione si parla di *sistema di blocco* cioè di un sistema costituito da logiche di distanziamento e da impianti di segnalamento. A seconda del tipo di impianti e del principio di funzionamento si distinguono diversi sistemi di blocco.

Tutti i sistemi di blocco, tuttavia, si basano sul distanziamento ad intervallo di spazio e, quindi, sul distanziamento effettuato mediante sezioni di blocco.

È possibile distinguere i diversi sistemi di blocco in base al regime di circolazione che attuano:

- Sistemi di blocco che attuano la circolazione a regime chiuso:
  - o Regimi del consenso telegrafico e telefonico (o blocco telegrafico e telefonico);
  - o Blocco elettrico manuale;
  - o Blocco conta assi.
- Sistemi di blocco che attuano la circolazione a regime aperto:
  - o Regime del giunto;
  - o Blocco elettrico automatico a correnti fisse;
  - o Blocco elettrico automatico a correnti codificate;
  - o Blocco mobile.

Adottando, invece, un criterio di classificazione basato sugli impianti utilizzati per attuare il blocco in linea si distinguono:

- sistemi di blocco privi di impianto di blocco:
  - o Regime del giunto;
  - o Regimi del consenso telegrafico e del consenso telefonico;
- sistemi di blocco con impianto di blocco semiautomatico:
  - o Blocco elettrico manuale;
- Sistemi di blocco con impianto di blocco automatico:
  - o Blocco elettrico automatico a correnti fisse;

- Blocco elettrico automatico a correnti codificate;
- Blocco elettrico automatico conta assi.

Sistemi di blocco privi di impianto di blocco

Regime del giunto.

Nel gergo tecnico ferroviario il *giunto* è il dispaccio che conferma l'arrivo di un treno in una località di servizio, che generalmente è una stazione; il dispaccio può essere telegrafico o telefonico.

Sia A la stazione che deve istradare un convoglio e B la stazione successiva che deve riceverlo. Quando il convoglio giunge alla stazione B il suo DM deve accertarsi che il convoglio sia giunto completo, cioè senza aver lasciato carrozze e/o carri lungo la linea e deve inviare il più rapidamente possibile un dispaccio telegrafico di giunto alla stazione A del tipo <<*Treno ... giunto*>>, indicando il numero distintivo del treno. Il DM della stazione A, a sua volta, prima di inviare il treno successivo deve aver ricevuto il dispaccio telegrafico inviatogli dalla stazione B.

Nel caso di dispacci trasmessi tramite telefono questi devono essere registrati su appositi protocolli<sup>11</sup> sia nella stazione che li trasmette che in quella che li riceve e si adottano norme e controlli per garantirne la regolarità.

Tale sistema di blocco può essere attuato sia sulle linee a singolo binario che su quelle a doppio binario: sulle linee a doppio binario lo scambio dei dispacci avviene indipendentemente per ciascun binario, mentre sulle linee a singolo binario se la stazione B deve a sua volta istradare un treno verso la stazione A è esonerata dall'inviarle il dispaccio in quanto questo secondo treno giungendo in A costituisce il giunto del primo treno arrivato in B.

Per dare un'idea del *modus operandi* nel campo della circolazione ferroviaria, si esaminano le cinque fasi caratteristiche attuate con il regime del giunto.

L'accertamento della libertà della tratta di via compresa tra le due stazioni in esame, A e B, è compito di quella che deve istradare il treno e tale accertamento è costituito dalla verifica di essere in possesso del dispaccio del giunto dell'ultimo treno da essa inviato. Nel caso di linea a semplice binario l'accertamento è costituito dall'aver ricevuto un treno in senso opposto a quello da inviare.

Il segnale di partenza a via libera viene comunicato al macchinista del treno in partenza, in assenza di impianto di segnalamento, a voce o con segnalazioni a mezzo di bandiere o lanterne colorate. In

---

<sup>11</sup> Protocollo: nel gergo tecnico ferroviario indica il modulario per lo scambio di messaggi secondo regole e formule predefinite.

tal caso quest'operazione costituisce anche l'occupazione del segnale di partenza in quanto essendo specificamente realizzata solo per il treno in partenza non può essere percepita erroneamente anche da treni successivi.

La tratta di via percorsa dal treno appena partito è bloccata in quanto non è possibile inoltrare un secondo treno mancando il giunto del primo treno.

La liberazione della tratta di via avviene attraverso la trasmissione del giunto non appena il treno ha raggiunto la stazione di arrivo.

In assenza di alcun impianto di segnalamento lo svolgimento corretto di ogni fase è affidato esclusivamente all'uomo.

Il regime del giunto è un sistema di blocco che prevede la linea normalmente libera: la linea, che in questo caso coincide con la tratta di via tra due stazioni, è occupata solo quando è attraversata da un convoglio ed è immediatamente liberata appena il convoglio raggiunge la stazione di arrivo.

Questo sistema di blocco, attuato senza l'ausilio di alcun impianto di segnalamento, è oggi completamente in disuso.

Regime del consenso (o blocco) telegrafico e regime del consenso (o blocco) telefonico.

Per descrivere il regime del consenso o blocco telegrafico si consideri sempre una tratta di linea compresa tra due stazioni, diciamole A e B.

Si è visto che nel regime del giunto l'arrivo di un treno alla stazione B è seguito dal dispaccio che costituisce accertamento e conferma della libertà della via. In questo caso, invece, solo quando la stazione A deve inviare un treno alla stazione B chiede ad essa il consenso per poterlo inviare indicando anche l'ultimo treno già inviato. Ad esempio, la formula di richiesta del consenso a mezzo del telegrafo è del tipo: <<Seguito treno ... chiedo inviare treno ...>>.

La stazione B, che ha ricevuto la richiesta di consenso, verifica che il treno precedentemente inviato da A sia giunto e sia giunto completo e, quindi, trasmette il consenso ad A tramite, ad esempio, la formula <<Via libera treno ...>>.

Il regime del consenso telegrafico è attuato sia sulle linee a singolo binario che su quelle a doppio binario: sulle linee a semplice binario quando deve essere istradato un treno di senso opposto rispetto al precedente è fatto obbligo di specificarlo sia nella richiesta di consenso (<<Dopo giunto mia stazione treno ... chiedo inviare treno ...>>) che nella concessione del consenso (<<Dopo giunto vostra stazione treno ... via libera treno ...>>); mentre per le linee a doppio binario le richieste e le concessioni avvengono indipendentemente per ciascun verso di marcia.

Va osservato che tale sistema di blocco garantisce maggiore sicurezza rispetto al regime del giunto: in quest'ultimo, infatti, la sicurezza è affidata ad un singolo dirigente alla volta, mentre nel regime

del consenso vi è non solo uno scambio di informazioni, ma anche la conclusione di un accordo tra due dirigenti attraverso il meccanismo richiesta/concessione consenso.

La procedura è analoga per il regime del consenso telefonico fatta eccezione per il fatto che la richiesta e la concessione del consenso avvengono a mezzo del telefono.



**Figura 58: Regime del consenso telefonico**

Sia per il regime del consenso telegrafico che per quello telefonico le cinque fasi caratteristiche sono:

- l'accertamento della libertà della tratta di via è effettuato attraverso la richiesta del consenso dalla stazione A ed il rilascio del consenso dalla stazione B;
- la disposizione a via libera di un segnale di partenza consiste, in assenza di impianto di segnalamento, nella comunicazione a voce o con lanterne al macchinista del treno in partenza;
- l'occupazione del segnale coincide con la fase precedente in quanto nessun treno successivo può percepire il segnale di via libera fatto per il treno precedente;
- il bloccamento della tratta di via è accertato dal fatto che la stazione ricevente B non rilascerà alcun consenso fin quando il treno del consenso rilasciato precedentemente non è giunto ed intero;
- la liberazione della tratta di via consiste nella condizione che, quando il treno è giunto, il dirigente movimento di B è autorizzato a rilasciare un successivo eventuale consenso se gli viene richiesto.

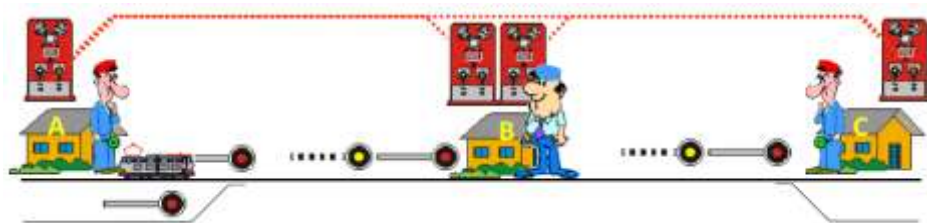
Anche in questo sistema di blocco la circolazione in sicurezza è affidata solo al corretto operato dell'uomo. Poiché la stazione ricevente B rilascia il consenso solo quando le viene inoltrata la richiesta, la linea è considerata normalmente bloccata e libera solo quando viene rilasciato un consenso ed inoltrato un treno.

Sistemi di blocco con impianto di blocco semiautomatico

Blocco elettrico manuale.

Il sistema del blocco elettrico manuale prevede che sia presente un operatore, DM o Guardablocco, in ogni posto di blocco. L'impianto di blocco elettrico manuale assiste l'operatore consentendogli di svolgere solo manovre non affette da errori di disattenzione o dimenticanza.

Infatti, considerando due stazioni successive e le fasi da svolgere per la circolazione in sicurezza, con il blocco elettrico manuale lo scambio di informazioni tra le due stazioni avviene tramite un'apparecchiatura manovrata dall'operatore denominata *istrumento di blocco*: in ogni posto di blocco è prevista l'installazione di un istrumento di blocco numerato collegato, a mezzo di conduttori, ad un altro istrumento di blocco installato nel posto di blocco adiacente; se sulla linea è presente un posto di blocco intermedio, diciamolo B, sono impiantati due istrumenti di blocco uno per il lato in comunicazione con la stazione A ed uno per il lato in comunicazione con la stazione C:



**Figura 59: Blocco elettrico manuale**

Tale sistema è definito di “blocco elettrico manuale” in quanto la richiesta e la concessione dei consensi per disporre a via libera una sezione di blocco sono effettuati dagli operatori, ma dispositivi elettrici verificano le condizioni di sicurezza e consentono la trasmissione tra un posto di blocco ed il successivo.

Infatti, il blocco elettrico manuale si basa su un impianto elettrico di collegamento tra i posti che delimitano le sezioni di blocco in cui è suddivisa la linea.

Per esaminare le fasi che si susseguono per instradare un treno da una stazione di partenza A ad una stazione di arrivo C è necessario dare una breve descrizione della struttura di un istrumento di blocco. Lo strumento ha forma di un parallelepipedo di dimensioni indicative 70 x 35 x 30 cm e consta di:

- una maniglia di richiesta consenso, MR;
- una maniglia di concessione consenso, MC;

- tre avvisatori a forma di disco che si indicano con A1, A2 ed A3. L'avvisatore A1 è relativo ai consensi ricevuti e può assumere quattro aspetti diversi: condizioni normali, strumento pronto a ricevere consensi, consenso pervenuto, consenso occupato dal treno che lo ha utilizzato. L'avvisatore A2 è relativo ai consensi concessi e può assumere tre aspetti diversi: assenza di qualche condizione per rilasciare il consenso, presenza di tutte le condizioni necessarie per rilasciare il consenso, consenso accordato. L'avvisatore A3 è relativo alla liberazione della maniglia MC dell'istrumento stesso e può assumere due aspetti: maniglia bloccata, liberazione sezione avvenuta (è possibile riportare la maniglia in posizione normale).
- due pulsanti per l'invio degli impulsi di partenza posti ciascuno al centro delle maniglie;
- una campana posta nella parete posteriore dello strumento che ripete acusticamente gli impulsi in arrivo.
- 



**Figura 60: Istrumento di blocco**

Esaminando le fasi caratteristiche della circolazione in sicurezza in piena linea si susseguono le seguenti operazioni in riferimento alla figura 59:

Fase I) Accertamento della *libertà della tratta di via* tra due stazioni successive.

Il DM della stazione A che deve instradare un treno e, per accertarsi della libertà della tratta fino al posto di blocco intermedio B, deve richiedere ed ottenere il consenso di via libera.

Allora, porta la maniglia di richiesta del proprio istrumento in posizione di richiesta ed invia, premendo il pulsante, un certo numero convenzionale di impulsi. Tali impulsi fanno suonare la campana dell'istrumento del PBI B.

Su una linea a binario singolo l'operatore di A non può portare la maniglia MR in posizione di richiesta di consenso se la maniglia MC è ancora in posizione di concessione o di consenso bloccato e cioè se è ancora in attesa di un treno in direzione opposta.

Fase II) *Disposizione a via libera di un segnale di partenza.*

L'operatore del PBI B, attraverso il suo strumento, ripete gli impulsi ricevuti da A per dare conferma di aver ricevuto la richiesta, porta la maniglia MC in posizione di consenso e preme a sua volta il pulsante per inviare una corrente continua: tale corrente continua fa sì che il segnale di blocco della stazione di partenza A si disponga automaticamente a via libera.

Fase III) *Occupazione del segnale di partenza.*

Il convoglio partito dalla stazione A passa su un dispositivo di campagna detto *dispositivo di occupazione* provocando l'occupazione del segnale di blocco della sezione su cui sta transitando cioè facendo tornare il segnale di blocco in aspetto di via impedita. L'operatore della stazione A trasmette a B un segnale convenzionale di treno *transitato* per comunicare l'avvenuta partenza.

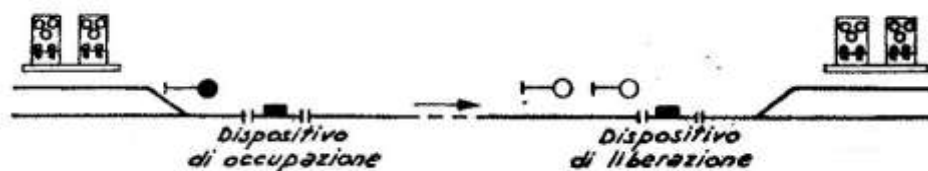
Fase IV) *Bloccamento della tratta di via.*

Avvenuta l'occupazione del segnale di partenza della stazione A, l'operatore in B porta la sua maniglia MC in posizione di bloccato: a questo punto l'impianto di blocco non consente al posto di blocco intermedio B di rilasciare altro consenso cioè l'istrumento in B è *bloccato* fino a quando il primo treno, giungendovi, non libera la sezione sbloccando l'istrumento.

Fase V) *Liberazione della tratta di via.*

A valle del segnale di uscita della sezione precedente quella del posto B è installato un dispositivo di campagna detto *dispositivo di liberazione*: il treno inviato dal precedente consenso transitando su tale dispositivo provoca la liberazione della maniglia MC del posto B.

La liberazione della sezione avviene quando l'ultimo asse di un convoglio passa sul dispositivo di liberazione, ma l'apparecchiatura non effettua l'accertamento della coda del convoglio che deve essere, invece, effettuato dal dirigente movimento della stazione di arrivo o dal guardablocco del posto intermedio.



**Figura 61: Dispositivi di campagna**

Inoltre, vanno fatte le seguenti precisazioni: se la linea è a singolo binario ogni posto di blocco non può richiedere un consenso, e quindi non può essere disposto a via libera il segnale di partenza, se

ha l'istrumento di blocco in posizione di consenso accordato ad un convoglio transitante in direzione opposta cioè se l'istrumento è bloccato. Per un posto di blocco intermedio, inoltre, deve essere impossibile concedere un consenso ad ambedue le stazioni corrispondenti (in figura 7 A e C). Se la linea è a doppio binario per ogni posto di blocco è impossibile richiedere un consenso alla stazione verso la quale si deve inoltrare un treno senza aver prima rilasciato il consenso alla stazione che deve inviare tale treno.

Infine, il blocco elettrico manuale attua un regime di circolazione chiuso cioè la linea è considerata normalmente occupata: solo quando è stato richiesto ed ottenuto il consenso una sezione è considerata libera e cioè solo per un breve periodo che precede l'istradamento del treno.

### Sistemi di blocco con impianto di blocco automatico

#### Blocco elettrico automatico a correnti fisse

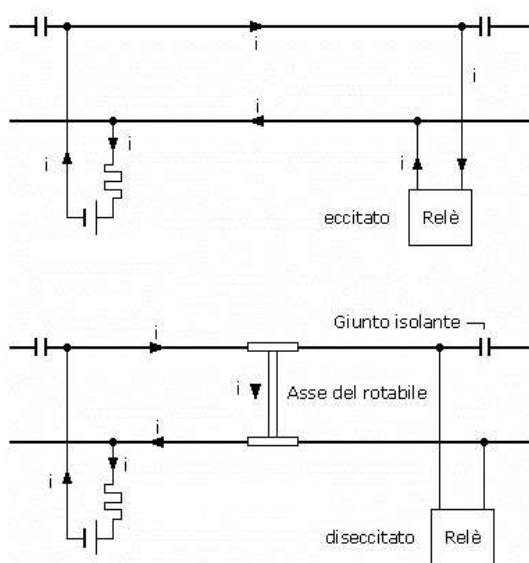
Come più volte descritto, per aumentare la potenzialità di una linea è necessario aumentare le sezioni di blocco ma ciò implica anche l'incremento del numero di posti di blocco intermedi. Una linea attrezzata con un impianto di blocco semiautomatico necessita di posti di blocco presenziati, sia se stazioni capolinea che se posti di blocco intermedi, con un incremento dei costi di esercizio notevole ed il più delle volte impraticabile.

La nascita degli impianti di blocco automatico ha consentito di risolvere questo problema e di ridurre i perditempo per la richiesta e la concessione dei consensi. Infatti, un impianto elettrico automatico prevede che la linea sia suddivisa in sezioni di blocco e ciascuna sezione di blocco sia attrezzata con un *circuito di binario*: il segnale di blocco di ciascuna sezione è posto normalmente a via libera (ad esclusione di quelli di stazione o a protezione dei passaggi a livello) ed appena un convoglio entra nella sezione passa a via impedita proteggendolo e ritornando a via libera solo dopo che il convoglio ha liberato la sezione. L'impianto, dunque, è automatizzato completamente senza il bisogno dell'intervento umano.

Nella figura 10 è mostrato uno schema semplificato di circuito di binario: il circuito è realizzato utilizzando come conduttori le due rotaie ed è alimentato in corrente alternata a 50 Hz da una sorgente di forza elettromotrice posta all'uscita della sezione. Il circuito è, inoltre, collegato ad un relè posto all'ingresso della sezione. Quando un convoglio entra nella sezione il suo primo asse cortocircuita il circuito di binario diseccitando il relè all'ingresso: il relè a sua volta è collegato al segnale di blocco della sezione e ne provoca il cambiamento d'aspetto che passa da via libera (verde) a via impedita (rosso). Fin quando è presente un asse sul circuito di binario il segnale di



blocco permane a via impedita; quando l'ultimo asse del treno abbandona la sezione, l'alimentazione riprende per l'intero circuito ed il segnale di blocco torna a via libera.



**Figura 62: Circuito di binario libero (in alto) ed occupato (in basso)**

Come già accennato, il blocco automatico a correnti fisse attua un regime di circolazione aperto ed automatizza completamente la sequenza delle fasi necessarie per l'immissione su una tratta di un treno. Inoltre, la circuitazione intera della linea consente di rilevare anche un' eventuale sconnessione della rotaia, un dissesto del binario o un suo interrimento: infatti, l'occupazione della sezione in assenza di un treno istradato è sintomo di un malfunzionamento dell'impianto.

Blocco elettrico automatico a correnti codificate.

Anche in questo sistema di blocco la linea è suddivisa in sezioni di blocco cui corrispondono circuiti di binario. L'alimentazione dei circuiti è in corrente alternata ma viene ciclicamente interrotta in modo da creare una corrente pulsante al posto di una corrente fissa. Si definisce *periodo di codificazione* il periodo ottenuto come somma dell'intervallo di alimentazione e di quello di interruzione, mentre si definisce *frequenza del codice* l'inverso del periodo di codificazione. In base alle diverse frequenze si distinguono diversi codici; ad esempio, un *codice 75* si ottiene se l'alimentazione è immessa e tolta 75 volte al minuto, il che significa che il periodo di codificazione ha una durata di  $60/75 = 0.8$  secondi e sarà, pertanto, costituito da 0.4 secondi di alimentazione e 0.4 secondi di interruzione.

Utilizzando diversi codici è possibile ottenere due diverse funzioni da un impianto a correnti codificate:

- realizzare un sistema di blocco automatico che non necessita di alcun conduttore lungo la linea anche in presenza di posti di blocco intermedi;
- ripetere a bordo del veicolo l'aspetto dei segnali fissi.

La prima funzione può essere meglio descritta con riferimento alla seguente figura:

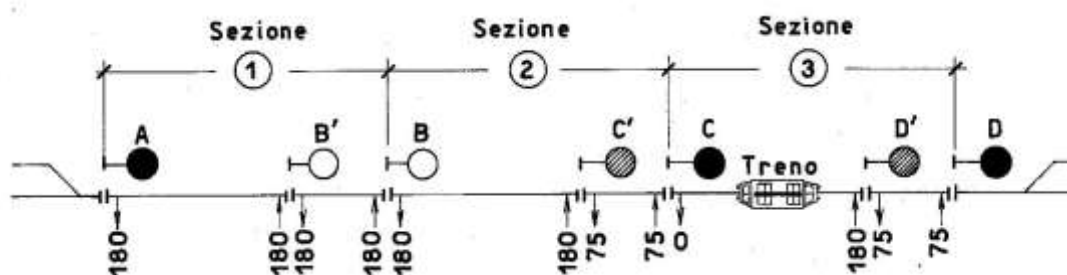


Figura 63: Sequenza di codici

La figura 11 mostra una tratta di linea compresa tra due stazioni, suddivisa in tre sezioni di blocco non concatenate con un convoglio in circolazione da sinistra verso destra.

Con tale sistema di blocco è possibile trasmettere a qualsiasi segnale lungo la linea l'aspetto del segnale successivo cioè la condizione di libertà o occupazione del circuito di binario che lo segue ed altre informazioni relative all'aspetto degli altri segnali successivi da cui dipende il suo aspetto. Ad esempio, il segnale di protezione della stazione finale D è posto a via impedita in quanto non riceve alcuna alimentazione dai binari di stazione ed invia al circuito di binario precedente un codice 75 che pone il segnale di avviso D' in aspetto giallo; il segnale di blocco C non riceve alcuna alimentazione dal binario a valle in quanto il circuito è occupato e, quindi, si porta a via impedita ed invia al circuito che lo precede un codice 75; il segnale di avviso C' riceve un codice 75 dal circuito a valle e si porta in aspetto giallo in quanto il successivo circuito di binario è occupato; il segnale di protezione B riceve un codice 180 e si porta a via libera come anche il segnale B' ed il segnale A che è pronto per essere manovrato dalla stazione di partenza per instradare un treno successivo.

La seconda funzione, cioè di ripetizione a bordo dei segnali, è di fondamentale importanza in quanto consente di porre rimedio a due annosi problemi della sicurezza della circolazione ferroviaria: la distrazione o assuefazione del macchinista e la presenza di condizioni di visibilità avverse per nebbia, neve o pioggia intensa. Inoltre, è possibile conservare memoria dell'indicazione a bordo per poterla osservare anche successivamente al transito nella zona di visibilità e collegare all'indicazione del segnale un richiamo acustico che richiami l'attenzione del

macchinista e, negli impianti più sofisticati, collegarla direttamente al sistema di frenatura che interviene automaticamente in caso di superamento di un segnale a via impedita.

Gli impianti di ripetizione a bordo dei segnali sono distinti in:

- sistemi puntiformi;
- sistemi continui.

I sistemi continui sono gli impianti di ripetizione a bordo che possono essere impiegati in accoppiamento al blocco a correnti codificate. Il veicolo è attrezzato con un dispositivo a bordo costituito da due bobine dette *captatori* e da un decodificatore. Il dispositivo di bordo è in grado di decodificare il codice della corrente che circola nel primo asse del convoglio che impegna un circuito di binario e di ripeterlo al macchinista come segnale ottico. In questo modo, anche se l'aspetto del segnale cambia dopo che il convoglio lo ha superato, se il codice della corrente cambia viene comunque recepito dal sistema di bordo; per questo motivo si tratta di una ripetizione continua del segnale perché è come se il convoglio portasse sempre con sé l'ultimo segnale incontrato.

I sistemi puntiformi prevedono un dispositivo montato in corrispondenza di ogni segnale di linea ed un'attrezzatura montata a bordo del veicolo. I dispositivi montati lungo la linea sono delle casse metalliche dette *boe* che sono fissate alle traverse tra le due rotaie del binario. Le boe sono dette *inerti* in quanto non necessitano di alcuna alimentazione esterna eccitandosi al passaggio del convoglio. Ogni veicolo di testa è attrezzato con una bobina alimentata con l'energia di bordo e posizionata nella zona sottostante della cassa in modo da interfacciarsi con le boe: la bobina emette onde elettromagnetiche al passaggio su una boa e riceve le onde riflesse dalla boa che contengono delle informazioni che sono funzione dell'aspetto del segnale cui la boa è collegata. Un decodificatore di bordo trasforma queste informazioni in una ripetizione ottica ed, eventualmente, trasmette anche il comando di frenatura. Tuttavia, la ripetizione del segnale è discontinua: infatti, se l'aspetto del segnale muta in seguito al transito del convoglio non vi è modo di comunicare a bordo tale informazioni sino al raggiungimento della boa successiva cioè del segnale successivo.

Blocco elettrico automatico conta assi.

L'impianto di blocco semiautomatico analizzato precedentemente cioè il blocco elettrico manuale necessita dell'intervento umano per l'accertamento della coda del treno. Il blocco conta assi, invece, prevede un impianto che autonomamente svolga sia la funzione di accertamento della via libera che quella di accertamento della completezza del convoglio.

La fase principale che consente di garantire la circolazione dei convogli su una stessa tratta di linea in sicurezza è senza dubbio quella inerente l'accertamento della via libera: la sezione di blocco può

essere occupata da un treno solo dopo che è stata liberata dal treno precedente; la completezza di un convoglio partito da una stazione e giunto in un successivo posto di blocco garantisce che non vi siano veicoli del convoglio fermi lungo la tratta di linea.

Considerando un'unica sezione di blocco delimitata da due stazioni, un impianto di blocco conta assi prevede per ogni binario:

- due *punti di conteggio*, ubicati ai due estremi della sezione;
- un *gruppo contatore*, montato in una delle due stazioni estreme.

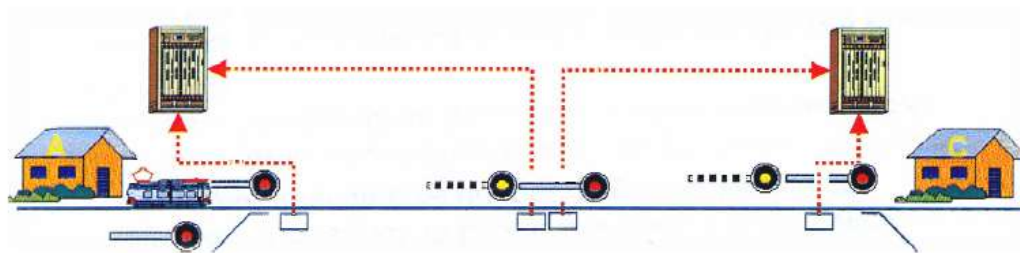


Figura 64: *Blocco conta assi*

I punti di conteggio sono dei dispositivi di campagna (*pedali*) che inviano sia un segnale di controllo continuo per informare del corretto funzionamento dell'impianto (l'interruzione di tale segnale fa scattare automaticamente il segnale di blocco a via impedita) che un impulso al passaggio di ogni ruota del convoglio. I punti di conteggio sono in grado di contare gli assi di un convoglio in entrambi i sensi di marcia e funzionano anche nel caso di conteggio simultaneo nei due sensi di marcia uno per ciascun pedale.

Il gruppo contatore riceve gli impulsi trasmessi dai due pedali, *lontano* e *vicino*, li conta e confronta il numero di impulsi trasmessi dal pedale lontano con quello degli impulsi trasmessi dal pedale vicino: se la differenza è nulla, la sezione di blocco è libera.

Se la tratta tra due stazioni A e C viene suddivisa in due sezioni di blocco per aumentare la potenzialità della linea, sono realizzati dei posti di blocco intermedi che, in questo caso però, sono impresenziati non essendo necessario né l'intervento diretto sull'apparecchiatura, né l'accertamento della coda del treno. Ogni posto di blocco intermedio prevede due pedali: uno collegato al gruppo contatore della stazione A ed uno collegato al gruppo contatore della stazione C:



**Figura 65: Blocco conta assi con posto di blocco intermedio**

Il blocco conta assi attua un regime di circolazione aperto; infatti, le sezioni sono normalmente poste a via libera e vengono occupate solo quando effettivamente vi transita un convoglio.

#### Confronto tra i sistemi di circolazione

La prima sostanziale differenza che è da evidenziare tra i diversi sistemi di circolazione consiste nella presenza o meno di un impianto di blocco il che implica la dipendenza nulla, parziale o totale dall'intervento umano.

Allora, un primo confronto da farsi è tra i regimi di circolazione basati integralmente sull'operato umano e quelli coadiuvati da impianto di blocco.

La logica di sicurezza del regime del giunto è paragonabile con quella dei blocchi elettrici automatici (con circuiti di binario e con pedali conta assi): il regime di circolazione attuato è per entrambi aperto cioè la linea è considerata normalmente a via libera con i segnali fissi che vengono occupati solo a valle del convoglio da proteggere e si liberano non appena il convoglio ha liberato la sezione.

Il sistema del blocco elettrico manuale, invece, si basa su una logica di sicurezza concettualmente simile a quella del regime del consenso (telegrafico o telefonico): il regime di circolazione è chiuso cioè con linea normalmente a via impedita e la via libera accertata solo in seguito a richiesta e concessione del consenso per ciascun determinato treno.

Ancora, confrontando il blocco automatico conta assi con quello a circuiti di binario si evidenzia che il blocco conta assi presenta come vantaggi:

- di non prevedere sezionamenti delle rotaie mediante giunti di isolamento;
- di avere costi di installazione contenuti data la semplicità delle apparecchiature (due soli pedali riescono a servire anche una sezione di blocco molto lunga);
- di presentare minori problematiche tecniche di natura elettrica.

Viceversa, le deficienze di un blocco conta assi possono riassumersi in:

- limitazione al numero di posti di blocco intermedi realizzabili. Infatti, viene considerata la probabilità di errore di conteggio del gruppo contatore posto in una stazione che viene, quindi, dotato di un *tasto di liberazione artificiale* per azzerare il contatore dopo un accertato errore di conteggio. Sorge il problema, dunque, di installare il contatore sempre in una stazione presenziata il che implica che non è possibile interporre più di un posto di blocco intermedio non presenziato tra due stazioni;
- non controllo della continuità delle rotaie;
- consente la ripetizione dei segnali a bordo solo con l'installazione di un apposito impianto separato.

In generale, comunque, i vantaggi derivanti dalla presenza di un impianto di blocco, semiautomatico o automatico, sono molteplici. Il primo consiste sostanzialmente nella realizzazione di collegamenti elettrici tra gli enti della linea (rotaie, deviatori, pedali, circuiti di binario) ed i segnali fissi ad aspetto variabile: tali collegamenti consentono di trasmettere la condizione di libertà o di occupazione della sezione di blocco al segnale stesso. Inoltre, i collegamenti elettrici possono essere realizzati anche tra un posto di blocco ed il successivo, siano essi stazioni o posti di blocco intermedi, e ciò favorisce lo scambio di informazioni corrette e sicure cioè private in grossa parte dall'errore umano. La deresponsabilizzazione degli operatori ha come conseguenza una riduzione ed una semplificazione delle procedure di esercizio che vengono inglobate nella logica di funzionamento degli impianti di sicurezza e segnalamento: meno procedure e maggiore semplicità significano minore probabilità di errore umano e diminuzione dei perditempo inerenti le varie operazioni di circolazione.

In definitiva, un impianto di blocco consente di aumentare la potenzialità di una linea, di ridurre i costi di esercizio relativi al personale e di aumentare la sicurezza nella circolazione in piena linea.

Di contro, un impianto di blocco presenta l'inconveniente di poter guastarsi. In caso di guasto agli apparati elettrici le procedure di esercizio prescrivono di passare a regimi di esercizio<sup>12</sup> (trattati nel seguito) basati su comunicazioni telefoniche e, quindi, al regime del consenso telefonico. Nell'eventualità, rara ma possibile, di completa interruzione anche dei collegamenti telefonici tra un posto di blocco e l'altro si passa al distanziamento a tempo, integrato con prescrizione di marcia a vista per il convoglio instradato a seguito di un altro nello stesso senso di marcia.

Come risulta, pertanto, i regimi di circolazione basati sul distanziamento a tempo non sono del tutto in disuso, ma anzi, possono subentrare in sostituzione dei più moderni regimi di circolazione.

---

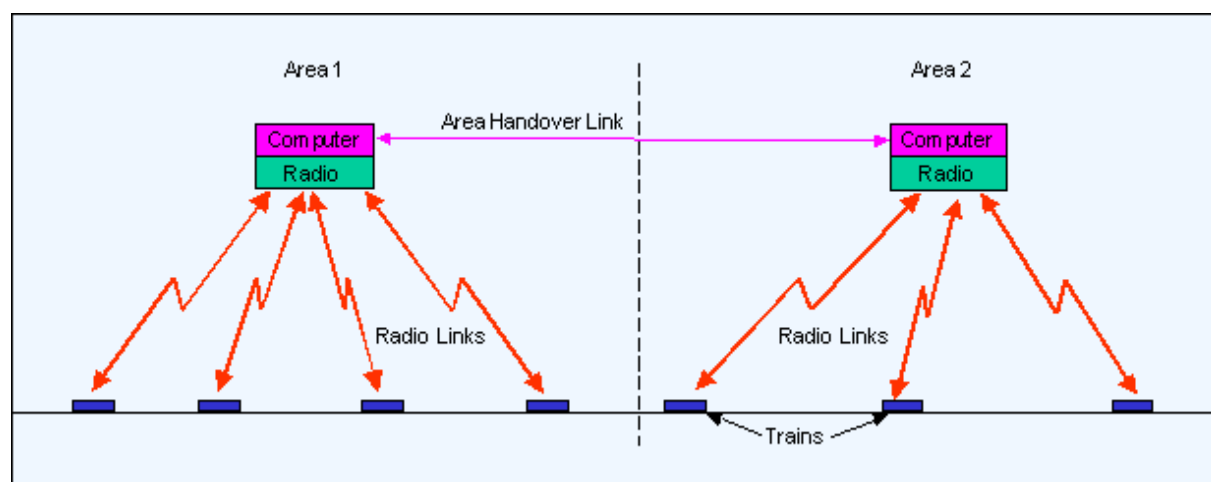
<sup>12</sup> Regime di esercizio: Modo di organizzare l'esercizio ferroviario con particolare riguardo alla gestione della circolazione dei treni.

Questa evenienza comporta, oltre che ripercussioni negative sulla potenzialità della linea e sul livello di sicurezza della circolazione, anche la necessità di disporre di personale specializzato che sia in grado di operare anche in condizioni di circolazione eccezionali.

#### Blocco mobile con trasmissione radio

La trasmissione a mezzo di onde radio è ormai già ampiamente adottata sia sulle linee AV che sulle linee metropolitane. Questa tecnologia consente lo scambio via onde radio delle informazioni tra linea e bordo; in questo modo ogni veicolo dispone di informazioni in modo continuo nel tempo e nello spazio e ciò consente di adattare il posizionamento e la lunghezza delle sezioni di blocco in funzione della posizione e della velocità dei convogli in linea.

Su una linea attrezzata con blocco mobile sono definite delle aree e la circolazione in ciascuna area è gestita da un computer (detto *zone controller* o *Radio Block Center*) che comunica con i veicoli in transito nella propria area attraverso il sistema di trasmissione radio:



**Figura 66: Blocco mobile e Trasmissione Radio**

Ciascun convoglio trasmette al computer dell'area che sta attraversando, in maniera quasi continua nel tempo, il proprio codice identificativo, la posizione, direzione e velocità. Il computer processa tali informazioni, elabora per ciascun convoglio il successivo punto di arresto e trasmette tale informazione.

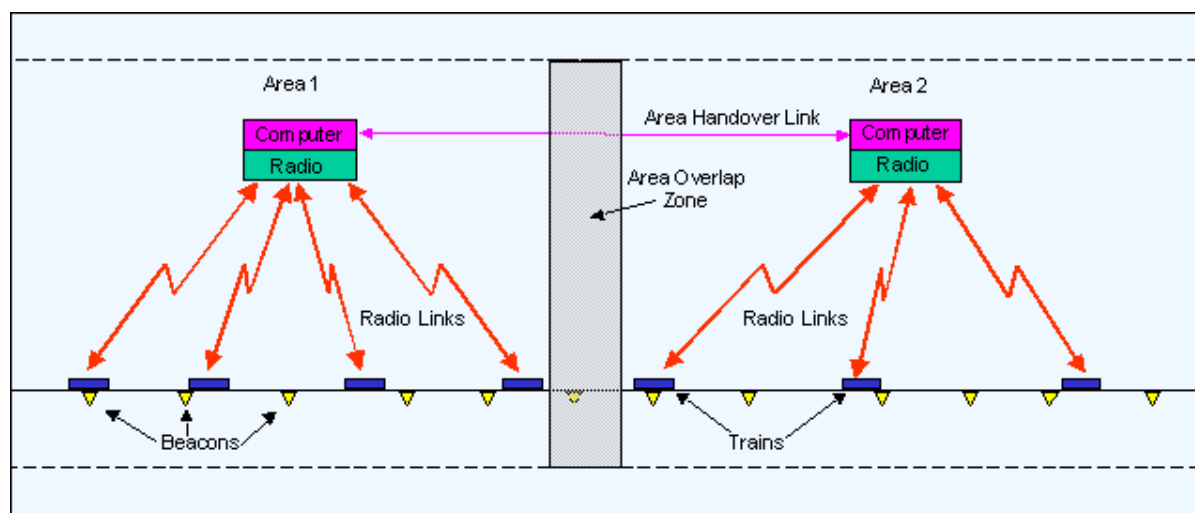
Il collegamento radio tra ciascun convoglio ed il computer controllore di area è quasi continuo nel tempo (a meno dei ritardi di elaborazione e trasmissione dati) cosicché il computer conosce quasi istante per istante la posizione di ogni convoglio nella sua area.

Il blocco mobile con trasmissione radio è spesso indicato come *Communications Based Train Control* (CBTC).

Ad oggi esistono già delle linee attrezzate con CBTC che, tuttavia, applicano ancora il distanziamento a blocco mobile assoluto. Infatti, la gestione del traffico ferroviario su tali linee prevede che i convogli siano sempre tutti ad una distanza pari almeno a quella di arresto calcolata a partire dalla velocità massima di linea e con le prestazioni frenanti del veicolo peggiore. In tal modo in caso di interruzione delle trasmissioni radio prolungata oltre un certo valore limite viene comandata la frenatura di emergenza e ciascun treno dispone della distanza necessaria ad arrestarsi senza collisione.

Per consentire a ciascun treno di aggiornare di comunicare al controllore di area la propria posizione corretta sono posizionate delle boe ad intervalli regolari lungo il tracciato che consentono di correggere la posizione e la velocità del treno calcolate dal computer dagli errori del sistema odometrico.

Per gestire la transizione da un'area a quella successiva, i computer controllori di aree adiacenti sono, a loro volta, in comunicazione radio: come mostrato nella seguente figura, prima che un veicolo entri in un'area successiva viene già annunciato dal computer dell'area 1 al computer dell'area 2. Inoltre, il computer dell'area 1 comunica al treno di cambiare il proprio codice radio con quello della nuova area approssciata. Quando il computer della nuova area rileva il codice identificativo del treno ne acquisisce le relative informazioni dalla prima area ed il trasferimento è completato.



**Figura 67: Transizione tra aree controllate nel CBTC**

### 3.4 Impianti di segnalamento per la circolazione in ambito stazione



Si è detto che la sicurezza della circolazione in un piazzale di stazione è garantita dal corretto svolgimento delle sette fasi descritte precedentemente. Ciascuna fase presuppone delle attività che possono essere svolte manualmente dagli operatori, come in passato, con un dispendio notevole di uomini necessari, di energia fisica e di tempo che accresce all'aumentare della complessità e delle dimensioni del piazzale oppure, come accade oggi, possono essere impiantati apparati specifici che consentono di concentrare in un'unica postazione il comando ed il controllo degli enti di piazzale quali deviatori, segnali luminosi, passaggi a livello, ecc....

Proprio in virtù della possibilità di centralizzare il comando ed il controllo tali apparati sono definiti *apparati centrali* (AC) e si parla di *centralizzazione di un piazzale*. Come è intuitivo dedurre, l'adozione di un apparato centrale comporta non solo un aumento della sicurezza, in quanto non più affidata alla sola attenzione e serietà del personale, ma anche una notevolissima riduzione dei costi del personale. Vale la pena sottolineare che la sicurezza derivante da un apparato centrale non è dovuta solo alla possibilità di effettuare una manovra solo se sono verificate una serie di condizioni, ma anche alla possibilità di ricevere risposta dagli enti di piazzale alla richiesta di controllo inviata dall'apparato.

In aggiunta ai su citati vantaggi, la centralizzazione delle manovre degli enti di piazzale in un apparato centrale consente di realizzare le cosiddette *condizioni di sicurezza* cioè quell'insieme di verifiche e subordinazioni necessarie a far svolgere i movimenti treni ed i movimenti manovre in piena sicurezza in ambito stazione.

La sequenza di attività da svolgere per l'attraversamento della stazione di un convoglio costituisce un ciclo di condizioni che è possibile rappresentare schematicamente:



**Figura 68: Condizioni di ciclo**

Le condizioni di sicurezza che vengono realizzate da un apparato centrale sono sia condizioni relative alla singola manovra che condizioni di subordinazione di una manovra alla regolare esecuzione di un'altra manovra.

Un esempio di condizione di sicurezza relativa alla singola manovra è quella di impedire la manovra di un deviatoio che è impegnato da un itinerario o da un istradamento mentre un convoglio lo sta ancora attraversando. Mentre un esempio di una condizione di subordinazione è quella della manovra a via libera di un segnale alla formazione dell'itinerario, controllo e fermascambiatrice.

In generale, le condizioni di sicurezza necessarie possono riguardare la manovra di un deviatoio, possono essere condizione per disporre o mantenere a via libera un segnale o ancora per liberare un itinerario.

Merita sicuramente un approfondimento il gruppo di condizioni che interessa la manovra di un segnale. In merito, si distinguono:

- condizioni necessarie *per disporre a via libera* un segnale;
- condizioni necessarie *per mantenere a via libera* un segnale.

Le condizioni necessarie per disporre a via libera un segnale consistono nella formazione dell'itinerario (o istradamento), fermascambiatrice e controllo dei deviatoi, verifica della incompatibilità con altre vie e verifica della libertà della tratta di via (in stazione o in piena linea).

Le condizioni necessarie per mantenere a via libera un segnale, invece, sono le stesse di quelle per disporlo a via libera ma la loro esistenza deve essere verificata per tutto il tempo che il segnale deve permanere a via libera. Se anche solo una di queste condizioni non è verificata il segnale si riporta, automaticamente ed immediatamente, a via impedita.

Inoltre, imponendo il verificarsi di condizioni si può realizzare la cosiddetta *occupazione temporanea o permanente* del segnale.

Se si vuole realizzare un'occupazione temporanea del segnale si impone che al mancare di una certa condizione il segnale si porti a via impedita, ma non appena si verifica nuovamente la stessa il segnale torna automaticamente a via libera.

Se si vuole realizzare un'occupazione permanente, invece, si impone che al decadere di una certa condizione il segnale si porti a via impedita, ma anche al ripristinarsi della stessa conservi l'aspetto di via impedita fin quando non viene ripetuta la manovra.

Ancora, un altro gruppo di condizioni può riguardare la liberazione di un itinerario. Infatti, la liberazione di un itinerario autorizza a poter utilizzare i suoi deviatoi ed i suoi tratti di binario per formare altro itinerario ed, allora, le condizioni impongono che l'itinerario per il quale è stato posto a via libera il segnale non possa essere modificato prima che il convoglio non lo abbia attraversato. Le situazioni di rischio da evitare sono, infatti, la collisione tra convogli i cui itinerari hanno tratti

di binari comuni e, siccome i segnali contengono anche informazioni sulla velocità che il macchinista deve rispettare su quel determinato itinerario, evitare che l'itinerario originale sia modificato ed il convoglio si trovi a percorrere un itinerario diverso con una velocità compatibile con il primo itinerario, ma non con il successivo.

Nel rispetto della logica fail-safe della sicurezza della circolazione ferroviaria è contemplata l'eventualità che le tutte le condizioni decadano a causa di un guasto: in tal caso gli impianti sono predisposti in modo che non possa essere effettuata alcuna manovra o liberazione. Ad ogni modo, ciò implicherebbe, a rigore, che l'intero impianto di stazione sia inutilizzabile in toto o in parte fino al ripristino delle condizioni ed, allora, in tutti gli apparati si trovano dei *tasti di liberazione artificiale* o *di soccorso* che possono essere attivati da un operatore che, sotto sua responsabilità, è abilitato a proseguire con le sue operazioni.

Gli apparati centrali possono essere distinti in base all'energia con cui vengono realizzate le manovre ed in base al livello di automazione delle fasi di sicurezza.

In base all'energia impiegata per le manovre si distinguono:

- Apparati meccanici;
- Apparati idrodinamici;
- Apparati elettrici.

Gli *apparati meccanici* consentono la manovra a distanza sia dei segnali che dei deviatori.

Sia i segnali che i deviatori sono comandati a mezzo di trasmissioni flessibili cioè corde di acciaio disposte su piccole piantane ubicate a fianco dei binari e manovrate da grosse leve, una per ogni ente di piazzale tant'è che questi apparati sono anche definiti *apparati a singole leve*.



**Figura 69: Apparato meccanico**

Successivamente alla nascita di questo sistema, vengono utilizzate anche delle *chiavi* da introdurre nel dispositivo di manovra per poter azionare le leve: in tal modo è introdotta una condizione di

sicurezza da verificare prima di effettuare la manovra, infatti il possesso e l'introduzione della chiave nel dispositivo costituisce una condizione per disporre a via libera il segnale.

Gli *apparati idrodinamici* consentono di sostituire l'energia muscolare dell'operatore con quella idrodinamica: i vari enti di piazzale sono manovrati utilizzando acqua in pressione distribuita con numerose tubazioni correnti lungo il piazzale di stazione. L'acqua è accumulata e pressurizzata in un accumulatore, il Dirigente Movimento dalla postazione con un banco di manovra aziona le leve e pone in comunicazione l'accumulatore con la tubazione relativa all'ente da manovrare.

Con la nascita degli apparati idrodinamici nasce anche la definizione di *Posto Centrale* cioè di un'unica sede puntuale dalla quale un operatore può organizzare la circolazione in stazione. Naturalmente le funzioni che l'operatore può svolgere direttamente dal posto centrale dipendono dal livello tecnologico raggiunto nell'apparato centrale partendo dal semplice azionamento delle leve degli enti di piazzale fino ad arrivare alla gestione di più stazioni dalla stessa postazione.

Gli *apparati elettrici* effettuano le manovre degli enti a mezzo di motorini alimentati con corrente elettrica ed applicati agli enti stessi. Gli apparati possono essere a singole leve o a pulsanti di itinerario cioè ogni manovra è azionata premendo un unico pulsante sul banco di manovra.

Ma in che modo un apparato centrale può realizzare le diverse condizioni di sicurezza su menzionate? Attraverso dei *collegamenti* tra organi di comando o tra organi di comando e circuiti di comando e controllo degli enti di piazzale.

I primi tipi di collegamenti utilizzati sono stati i *collegamenti meccanici* realizzati tra organi di comando e tra organi di comando ed i diversi enti del piazzale. Infatti, in un apparato meccanico o idrodinamico si ha la presenza di un distinto organo di comando, chiamato *leva*, per ogni ente di piazzale, ciò che varia è l'energia con la quale viene azionata la leva. L'insieme di tutti i collegamenti meccanici è definita *serratura meccanica* dell'apparato centrale ed ogni condizione viene introdotta tramite collegamenti di serratura elettrica. Un collegamento di serratura meccanica è, in sostanza, una combinazione di posizioni che le diverse leve devono assumere e che definisce anche l'ordine in cui le diverse leve devono essere manovrate. Ad esempio, premesso che in un *apparato a leve singole* (cioè con tante leve quanti sono gli enti di piazzale da manovrare) ciascuna leva può assumere due possibili posizioni dette *normale* e *rovescia*, se si vuole indicare che per "rovesciare" la leva *a* è necessario che la leva *b* sia "normale" e la *c* "rovescia" si scrive:

leva a lega b, c

espressione che indica che una volta rovesciata la leva *a*, la leva *b* è legata in posizione normale e la leva *c* rovescia (convenzionalmente si indica la lettera o il numero della leva sottolineato se la leva è intesa in posizione rovescia). L'esempio è del tutto indicativo, ma utile per spiegare la logica di funzionamento di una serratura meccanica.

I collegamenti meccanici sono stati impiegati per gli apparati meccanici.

Con la diffusione dei controlli elettrici, le condizioni di sicurezza iniziano ad essere attuate mediante *collegamenti elettromeccanici* in cui ogni leva è immobilizzata o liberata grazie ad un elettromagnete eccitato o meno dalla chiusura o meno di un circuito elettrico. In questo caso, allora, l'insieme dei collegamenti elettromeccanici è definito *serratura elettrica*.

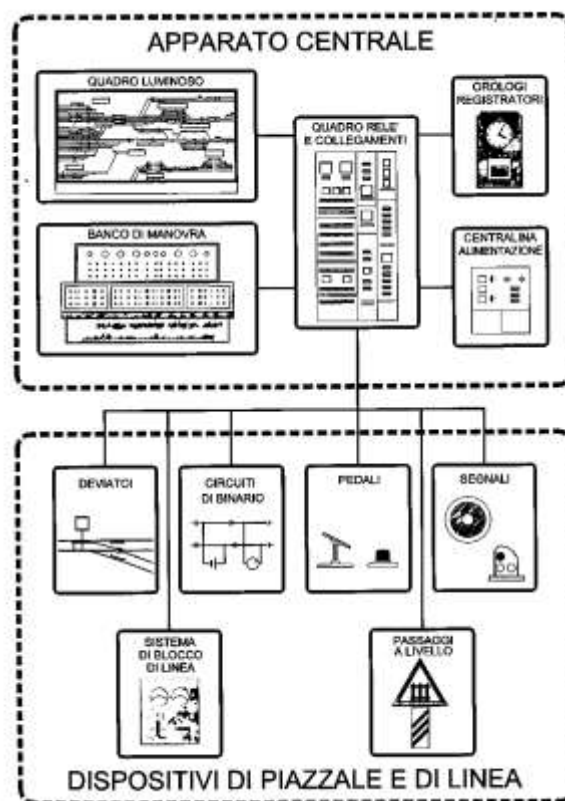
Ultimi per cronologia si trovano i *collegamenti elettrici* utilizzati negli apparati centrali moderni che utilizzano solo energia elettrica per la manovra degli enti. Gli apparati centrali moderni, ed oggi utilizzati, non prevedono un organo di comando per ogni ente di piazzale da manovrare, ma un organo di comando per ogni singolo movimento di treno o di manovra. Ogni manovra è comandata mediante un pulsante o una levetta e le componenti meccaniche dell'apparato si riducono a questi semplici elementi, mentre l'apparato è sostanzialmente costituito da relè e circuiti elettrici e, pertanto, anche le condizioni di sicurezza consistono nella chiusura o meno di un circuito composto da diversi relè.

Attualmente sono utilizzati solo apparati centrali elettrici. Venendo alle caratteristiche tecnologiche, un apparato centrale elettrico è costituito dai seguenti elementi:

- *Banco di manovra*, è l'elemento che consente l'interfaccia tra l'operatore, i dispositivi di comando e verifica e gli enti di piazzale. Il banco di manovra è ubicato nell'Ufficio Movimento della stazione;
- *Quadro luminoso*, riproduce su un pannello il piano schematico<sup>13</sup> della stazione e fornisce costantemente informazioni sull'aspetto dei segnali e lo stato dei binari;
- *Armadio dei Relè e dei Collegamenti*, è l'unità che realizza i collegamenti elettrici tra il banco di manovra e gli enti di piazzale. L'armadio generalmente è posto in un locale attiguo all'Ufficio Movimento, definito *sala relè*, in quanto può raggiungere dimensioni notevoli a causa dell'elevato numero di relè;
- *Orologi registratori*, memorizzano lo stato di particolari enti in funzione dell'orario, come l'aspetto di segnali o lo stato di circuiti di binario, e lo stato dispositivi, come la posizione delle leve di manovra dei deviatori ;
- *Centralina di alimentazione e riserva*, provvede all'alimentazione elettrica dell'apparato e dei dispositivi anche nel caso di interruzione dell'alimentazione di rete mediante motore diesel.

---

<sup>13</sup> Piano schematico: Rappresentazione non in scala dei binari e di tutti gli enti di piazzale, eseguita sulla base della planimetria della stazione. Sul piano schematico sono anche rappresentati il Fabbricato Viaggiatori e gli altri edifici di servizio.



**Figura 70: Schema di funzionamento di un apparato centrale**

È possibile, inoltre, adottare un criterio di classificazione degli apparati centrali basato sul livello di automazione per lo svolgimento delle manovre che distingue:

- ApparatI Centrali Elettrici a leve singole (ACE);
- ApparatI Centrali Elettrici a pulsanti di Itinerario (ACEI);
- ApparatI Centrali Statici (ACS);
- ApparatI Centrali Statici Multistazione (ACSM).

#### ApparatI Centrali Elettrici a leve singole (ACE)

In un apparato centrale elettrico a leve singole ogni manovra viene svolta azionando una specifica leva. Tutte le leve sono disposte su un banco di manovra la cui lunghezza è funzione del numero di leve; dimensioni orientative di un banco di manovra sono 1.25x0.80x1.00 m. Il banco di manovra è montato in un locale adiacente al fabbricato viaggiatori definito *cabina* con il suo asse maggiore parallelo ai binari. Se la linea è dotata di un blocco elettrico manuale, sul banco di manovra sono posizionati anche gli strumenti di blocco.

Le condizioni di sicurezza possono essere attuate mediante serratura meccanica o mediante serratura elettrica. La generica condizione di sicurezza è verificata dalla circolazione della corrente nel circuito che è possibile solo se il circuito viene a sua volta chiuso da relè che possono essere eccitati o meno a seconda se circola o meno corrente in altri circuiti ad essi collegati, ad esempio i circuiti di binario.

I circuiti elettrici utilizzati per la verifica delle condizioni di sicurezza vengono raggruppati in appositi armadi che, a seconda delle dimensioni, possono essere disposti nell'Ufficio Movimento, in cui vi è anche la cabina, o nella sala relè.

Il quadro luminoso di un ACE è costituito da una lastra di vetro su cui è rappresentato schematicamente il piazzale: vi sono spie colorate che riproducono l'aspetto dei segnali e serie di lampadine dietro il cristallo la cui accensione o spegnimento riproduce lo stato di eccitazione dei relè corrispondenti ai circuiti di binario.

L'apparato centrale elettrico è alimentato dalla centralina di alimentazione e riserva posta, in genere, nella sala relè.

La cosiddetta *parte di campagna* dell'apparato (cioè i dispositivi collocati fuori dalla cabina) è costituita da cavi, che partono dalla cabina e raggiungono i vari enti di piazzale, e dagli enti stessi di piazzale.



**Figura 71: Banco di manovra di un Apparato Centrale Elettrico a leve singole**

#### Apparati Centrali Elettrici a pulsanti di Itinerario (ACEI)

Con un ACEI il comando di un itinerario o di un istradamento è realizzato mediante l'azionamento di un solo pulsante: ogni ente impegnato dall'itinerario o dall'istradamento è manovrato automaticamente dai dispositivi dell'apparato. Le condizioni di sicurezza sono realizzate mediante

collegamenti elettrici formanti la serratura elettrica. Considerando le fasi per l'inoltro di un convoglio su di un itinerario, solo la prima cioè *formazione dell'itinerario* è manuale, mentre tutte le successive sono automatiche.

Ogni pulsante può assumere tre posizioni diverse:

- Posizione di riposo, in automatico il pulsante torna in questa posizione se non premuto;
- Pulsante *premuto*, per iniziare la formazione di un itinerario l'operatore preme il pulsante corrispondente;
- Pulsante *estratto*, l'operatore può decidere di annullare una manovra appena iniziata estraendo il pulsante.

La tecnologia con cui è realizzato un ACEI è definita a *logica cablata* : le condizioni di sicurezza sono realizzate attraverso un insieme di relè interconnessi tramite conduttori elettrici (cablaggi). Ad esempio, la libertà della via di un itinerario è associata alla circolazione di corrente in un circuito in cui vi sono una serie di interruttori elettrici (relè) collegati ai circuiti di binario: se il circuito di binario è libero e, quindi, il corrispondente relè è eccitato il relè si porta in posizione tale da consentire la circolazione della corrente nel circuito di verifica della libertà della via. Tutti i relè di tutti i circuiti di binario impegnati dall'itinerario sono disposti in serie in modo che solo nel caso in cui tutti siano liberi, e quindi tutti i relè eccitati, può circolare la corrente nel circuito di verifica.

Un ACEI, oltre alla possibilità di svolgere tutte le operazioni per l'arrivo e la partenza di un convoglio in stazione azionando un semplice pulsante, anche la cosiddetta *liberazione elastica* dell'itinerario. In un apparato meno sofisticato di un ACEI per liberare un itinerario è necessario attendere che il convoglio lo abbia completamente attraversato; la liberazione elastica, invece, consiste nella liberazione progressiva degli enti impiegati nell'itinerario man mano che il convoglio li ha superati. Ciò li rende più rapidamente disponibili per altri itinerari e, quindi, velocizza le operazioni. La liberazione elastica è possibile grazie alla presenza di circuiti di binario, nei vari tratti che costituiscono un itinerario, che rilevano la presenza del convoglio e trasmettono lo stato dell'ente alla serratura elettrica.

Un'ulteriore condizione di sicurezza esclusivamente consentita da un ACEI è il cosiddetto *comando perduto* grazie alla quale il comando impartito dalla pressione del pulsante viene registrato solo se le condizioni di sicurezza richieste sono soddisfatte; in caso contrario il comando si distrugge automaticamente e l'apparato non ne conserva memoria per impedire lo svolgimento del comando nel momento in cui le condizioni sono verificate, ma il comando non è opportuno.

Per quanto riguarda le componenti l'apparato centrale a pulsanti di itinerario è anch'esso dotato di un banco di manovra sul quale, nel caso in cui nel piazzale siano possibili anche istradamenti, i



pulsanti relativi alla formazione degli istradamenti sono raggruppati in una separata parte del banco rispetto a quelli relativi alla formazione degli itinerari.



**Figura 72: Banco di manovra ed armadio di un ACEI**

Il quadro luminoso riporta lo schema non in scala del piazzale, come per gli ACE, ma se ne differenzia per due caratteristiche.

La prima è quella di essere del tipo *sempre spento* cioè non vi sono indicazioni luminose se su l'impianto non sta avvenendo alcuna manovra: le lampade dei circuiti di binario si illuminano a luce rossa se i circuiti risultano occupati da convogli, mentre si illuminano a luce bianca quando sono impegnati da un itinerario o istradamento formato. In questo modo, la marcia di un convoglio può essere seguita sul quadro luminoso in quanto man mano che il convoglio avanza occupando i circuiti le lampade passano da luce bianca a luce rossa e man mano che vengono liberati passano da luce rossa a spento.

La seconda caratteristica di un quadro luminoso di un ACEI è la riproduzione della posizione dei deviatori indicata mediante illuminazione del ramo in tracciato retto o di quello in deviata, mentre sul quadro luminoso di un ACE è possibile prendere visione solo dell'aspetto dei segnali e dello stato dei circuiti di binario.

Anche un ACEI è, infine, dotato di una centralina di alimentazione e di riserva.

### Apparati Centrali Statici (ACS)

Un Apparato Centrale Statico costituisce un esempio dell'elevato livello tecnologico oggi raggiunto nel settore degli impianti di sicurezza per la circolazione in stazione.

Infatti, un ACS consente, oltre che di gestire la circolazione in sicurezza in stazione, di affrontare gli eventi di disturbo alla circolazione stessa, come ritardi, modifiche di orario, soppressioni di treni, minimizzando le ripercussioni negative sulla fluidità e regolarità. Infatti, nelle grandi stazioni l'ACS è collegato ad un sistema cosiddetto di *Supervisione* dal quale attinge gli orari e tutte le informazioni necessarie per ottimizzare la circolazione in caso di eventi perturbativi.

L'adozione di un tale impianto di stazione consente di elevare il livello del servizio di trasporto offerto agli utenti sia dal punto di vista qualitativo che quantitativo.

Infatti, la tecnologia impiegata in un ACS consente innanzitutto di garantire una maggiore regolarità<sup>14</sup> dell'esercizio del servizio di trasporto. La tecnologia impiegata consente di limitare, se non azzerare, una delle più frequenti cause che generano una riduzione della regolarità cioè gli errori nella regolazione del traffico. Inoltre, la rapidità con cui viene ripristinata ed ottimizzata la circolazione in caso di guasto (al materiale rotabile, agli impianti di sicurezza e segnalamento di linea) consente di arginare le ripercussioni sulla regolarità.

A maggior ragione la logica computerizzata consente di aumentare la potenzialità di una linea in quanto riduce i perditempo ed è in grado di gestire in modo rapido, sicuro ed ottimale un sistema, costituito da stazioni e tratti di piena linea, anche se molto complesso.

Entrando nello specifico della tecnologia, è da specificare innanzitutto che l'ACS è un apparato che usa una tecnologia a *logica programmata*: le varie funzioni di comando e controllo sono realizzate mediante un insieme di specifici programmi software e tutti gli enti di stazione, attraverso i quali è gestita la circolazione ferroviaria, sono sottoposti al controllo di uno o più elaboratori (detti anche *calcolatori*) a logica programmata.

Schematicamente l'architettura dell'impianto prevede:

- Un unico **Posto Centrale** dal quale vengono impartiti i comandi degli enti di piazzale;
- Uno o più **Posti Periferici**, installati in diversi punti nell'area della stazione, che consentono di attuare la manovra degli enti, il controllo del loro stato e la diagnostica di eventuali guasti;
- Gli **Enti di Piazzale** (deviatoi, segnali fissi luminosi, circuiti di binario, ecc.) con i relativi comandi ai posti periferici.

In ciascun Posto Centrale l'interfaccia con gli enti di piazzale si articola in due livelli funzionali:

---

<sup>14</sup> Regolarità: Si intende la puntualità dei treni e la capacità del sistema di circolazione di far rispettare ai treni l'orario di esercizio stabilito. La regolarità è un parametro utilizzato per definire la qualità del servizio di trasporto offerto alla clientela ed è, pertanto, sia un obiettivo che un criterio di gestione del servizio.

- Il primo livello riguarda la gestione delle comunicazioni tra il Nucleo in Sicurezza e le interfacce degli enti di piazzale. Tale funzione è svolta da apparecchiature dette *Concentratori* o *Controllori di Area*, esse consentono lo scambio delle informazioni tra il Posto Centrale ed i Controllori di Ente in modo rapido, affidabile e sicuro. Infatti, l'apparecchiatura esegue le elaborazioni necessarie per attuare e verificare le condizioni di sicurezza ed invia, tramite i controllori di ente, i *comandi sicuri* agli enti di piazzale.

La sicurezza delle elaborazioni è garantita dalla *logica 2 su 2* cioè vi sono due distinti processori che eseguono la stessa elaborazione, ma applicando algoritmi diversi e l'elaborazione è giudicata corretta solo se costituisce lo stesso risultato di entrambe le elaborazioni.

- Il secondo livello riguarda la gestione delle comunicazioni tra i Controllori di Area e gli enti del piazzale. Tale comunicazione avviene attraverso delle apparecchiature dette *Controllori di Ente* che hanno la funzione di manovrare gli enti di piazzale e controllarne lo stato, cioè sono l'interfaccia tra enti e controllore di area. Anche queste apparecchiature inviano comandi sicuri agli enti e la sicurezza è garantita anche in questo caso da una logica 2 su due.



**Figura 73: Architettura funzionale di un ACS**

Il Posto Centrale è costituito da varie unità funzionali, tra cui le principali sono:

- **Banco Operatore.** È la componente dell'apparato centrale che consente l'interfaccia tra il DM e l'apparato centrale stesso ed è situato nella cosiddetta *sala movimento*.

Ogni postazione di DM operatore è costituita da un *Terminale Operatore* (TO), da una *Tastiera Funzionale* (TF) e dal *Quadro Luminoso a Video* (QLv). Nella sala movimento è, generalmente, sempre presente anche il *Quadro Luminoso a Retroproiezione* (QLr).

Il TO è composto da un monitor, da una tastiera standard e da un mouse: il mouse e la tastiera consentono all'operatore la selezione dei comandi disponibili sul monitor. I comandi eseguibili tramite il TO sono comandi di emergenza: sul monitor compaiono i messaggi inviati dall'apparato con i relativi allarmi e loro identificazione per famiglia (segnali, deviatoli, PL, ecc.) ed il DM può selezionare uno dei comandi a disposizione a seconda del caso più idoneo a fronteggiare l'emergenza. Il Terminale Operatore è posto, generalmente, nell'armadio del Nucleo di Sicurezza.

La TF permette all'operatore di eseguire i comandi di apparato disponibili come avvio del ciclo di fasi per la disposizione di itinerari ed istradamenti, manovre di emergenza dei deviatoli, esclusione degli enti, ecc. L'avvio del ciclo di fasi per la disposizione degli itinerari e degli istradamenti può essere manuale o del tutto automatica.

Il QLv può essere composto da uno o più monitor sui quali è riprodotto schematicamente il piazzale e fornisce la visione dello stato degli enti rappresentati per la disposizione dei comandi di emergenza.

Il QLr è un video di grandi dimensioni, situato nella stessa sala del banco operatore, che mostra il piano schematico dell'impianto, cioè della linea e degli altri posti di servizio, aggiornato con la situazione del piazzale comandato e controllato dall'ACS.

Il Nucleo in Sicurezza accoglie l'Elaboratore (o Calcolatore) Centrale (indicato con l'acronimo CLC) di tutta la logica di impianto del sistema ACS. Esso costituisce l'unità fondamentale per il funzionamento del Posto Centrale; infatti, ha come funzioni principali:

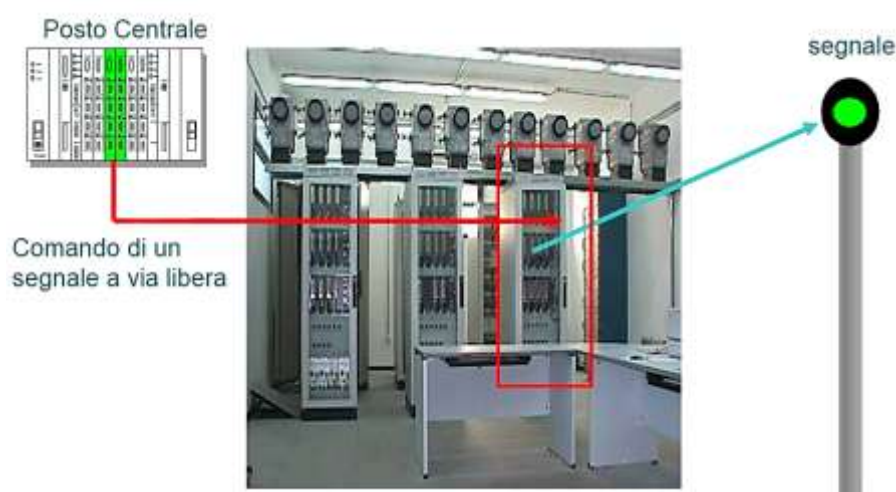
- La gestione automatica o manuale degli itinerari e degli istradamenti;
- Il comando ed il controllo di stato o posizione degli enti di piazzale (tramite i Posti Periferici);
- L'acquisizione e l'elaborazione delle informazioni diagnostiche per il rilevamento di discordanze a livello logico.

Il calcolatore riceve le informazioni sia dai posti periferici che dall'operatore nella postazione centrale attraverso la tastiera funzionale in caso di emergenza; ricevute queste informazioni il calcolatore esegue le elaborazioni necessarie per attuare e verificare le condizioni di sicurezza ed invia, tramite i posti periferici, i comandi sicuri agli enti di piazzale. La sicurezza delle elaborazioni è garantita dalla *logica 2 su 3* cioè vi sono tre distinti processori che eseguono la stessa elaborazione, ma applicando algoritmi diversi e l'elaborazione è giudicata corretta solo se due processori dei tre forniscono lo stesso risultato.

Nel calcolatore ad ogni ente di piazzale corrisponde una *scheda industriale*; le schede industriali consentono da una lato di ridurre notevolmente l'ingombro dell'armadio che le accoglie, dall'altro di superare l'enorme disagio di riconfigurazione dei circuiti di sicurezza, come nel caso degli ACE, in cui a seguito di modifiche strutturali agli enti di piazzale si presentava l'onerosa attività di riconfigurazione anche dei circuiti: infatti, ogni scheda può essere facilmente sostituita da un'altra programmata per il nuovo ente di piazzale.

Il Posto Periferico (o i Posti Periferici) è collegato al Posto Centrale e svolge la funzione di comandare e controllare gli enti di piazzale: il posto periferico costituisce, in sostanza, l'interfaccia tra il piazzale ed il posto centrale.

Il posto periferico riceve le informazioni dagli enti e le invia al posto centrale, mentre il posto centrale invia comandi al posto periferico che li esegue in sicurezza manovrando gli enti di piazzale.



**Figura 74: Posto Periferico (Ansaldo STS)**

Confronto tra le strutture operative degli apparati centrali

Risulta utile, a questo punto, confrontare la struttura operativa di un apparato centrale meccanico con quella di un apparato centrale elettrico (ACE, ACEI o ACS) soprattutto per evidenziare l'innovazione che quest'ultimo ha rappresentato per la gestione della circolazione in stazione e l'aumento del livello di sicurezza che ha comportato, oltre a tutti gli altri vantaggi economici e di riduzione del disagio fisico e mentale degli operatori già menzionati.

Nelle seguenti figure sono riportati gli schemi delle due diverse strutture: le componenti dell'apparato, sia esso meccanico o elettrico, sono distinte in componenti di cabina e componenti di

piazzale. La prima differenza da sottolineare è la presenza del quadro luminoso nell'apparato centrale elettrico: esso offre un validissimo supporto all'operatore che può conoscere in tempo reale è in modo sintetico lo stato dei vari enti di piazzale di cui il quadro gli offre una visione d'insieme. Negli apparati meccanici è indispensabile che il Digigente Movimento o altro agente controlli a vista i vari enti comandati tramite gli attuatori meccanici (leve a filo) con dispendio di tempo e disagio fisico per la fatica e l'esposizione alle intemperie.

La differenza fondamentale, tuttavia, risiede nell'interazione tra enti di cabina ed enti di piazzale: nell'apparato meccanico la corrispondenza è univoca nel senso che il DM può solo trasmettere comandi agli enti di piazzale senza la possibilità di ricevere alcun back ground né sullo stato degli enti prima della manovra né come verifica della correttezza della loro posizione assunta a seguito della manovra avvenuta.

Nell'apparato elettrico, invece, la corrispondenza è biunivoca cioè l'apparato svolge sia una funzione di comando che di controllo. La funzione di controllo degli enti di piazzale prima, durante e dopo il comando è possibile grazie all'introduzione negli enti di cabina della tecnologia a logica cablata (per gli ACE e gli ACEI) o programmata (per gli ACS).

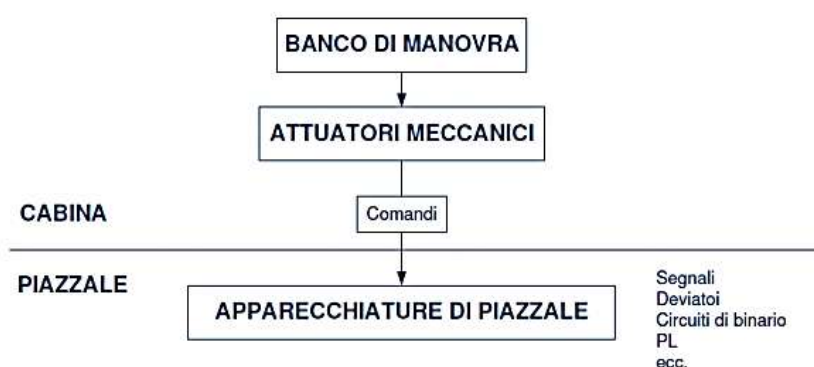
La logica cablata si ottiene collegando fisicamente tra loro tutte le apparecchiature che compongono l'impianto elettrico dell'apparato centrale cioè sia gli enti di cabina che quelli di piazzale in modo da riprodurre un determinato funzionamento in base ad uno schema definito dalle condizioni di sicurezza. Il vantaggio di questa logica risiede nella semplicità di realizzazione che, tuttavia, si conserva fino a quando i piazzali di stazione non assumono dimensioni e/o complessità notevoli e nella facilità di comprensione delle apparecchiature che agevola le operazioni di manutenzione che possono essere, quindi, svolte anche dal personale ferroviario. Gli svantaggi consistono nelle dimensioni che assume l'armadio dei relè e dei collegamenti per i piazzali più complessi e nella scarsa flessibilità dell'impianto. Infatti, nel momento in cui vengono apportate modifiche alla configurazione degli enti di piazzale bisogna ricablare l'impianto in base al nuovo schema cioè modificare i collegamenti elettrici; tale operazione, siccome molto lunga e complicata, viene spesso considerata più dispendiosa della sostituzione parziale o totale dell'impianto stesso.

Un altro svantaggio della logica cablata risiede nella presenza di numerosi elementi elettromeccanici che, quindi, sono particolarmente soggetti ad usura.

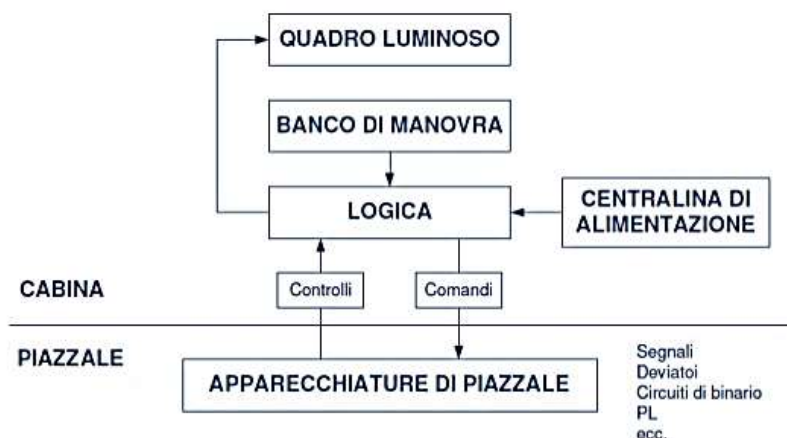
La logica programmata si avvale dell'utilizzo di calcolatori e tutte le apparecchiature sono collegate al calcolatore in maniera standard a prescindere dalle caratteristiche del piazzale. Una volta collegate tutte le apparecchiature viene programmato con specifici software e schede industriali il controllo degli enti di piazzale. I vantaggi della logica cablata consistono sostanzialmente sul minor spazio occupato in cabina e sulla versatilità dell'apparecchiatura: in caso

di modifiche alla struttura del piazzale è sufficiente cambiare la singola scheda industriale e riprogrammare il calcolatore.

Uno svantaggio di un tale sistema così tecnologico risiede nella necessità di disporre di operatori altamente specializzati sia per l'installazione iniziale che per le operazioni di manutenzione straordinaria in caso di guasti, operatori che il più delle volte sono necessariamente a dipendenza dell'azienda proprietaria e commerciale della tecnologia stessa. Internalizzare tale operazioni richiede, infatti, la formazione di personale altamente specializzato e, quindi, costi aggiuntivi per la formazione e costi superiori del personale con più alto grado di qualifica.



**Figura 75: Apparato centrale meccanico**



**Figura 76: Apparato centrale elettrico**

#### Apparati Centrali Statici Multistazione (ACSM)

Con un Apparato Centrale Statico l'architettura funzionale (mostrata in figura 20) si ripete identicamente per ogni stazione. L'innovativa concezione di centralizzare il comando ed il

controllo degli enti di piazzale di una stazione in un posto centrale ha gettato le premesse per lo sviluppo della tecnologia successiva cioè l' Apparatto Centrale Statico Multistazione che costituisce, attualmente, la più moderna per la circolazione in stazione.

In un ACSM esiste un unico posto centrale a cui fanno riferimento tutti i posti periferici ubicati ciascuno in una stazione. L'ACSM, dunque, controlla e comanda da remoto sia un'area estesa, in cui vi sono i posti periferici (attraverso controllori di area e controllori di ente), che tutti i dispositivi di linea.

Dal posto centrale è possibile svolgere tutte le funzioni che riguardano sia la circolazione in piena linea che in stazione, gestire la diagnostica dei componenti, gli allarmi e le situazioni di degrado.

Nella sala movimento del posto centrale di un ACSM è presente un quadro luminoso a retroproiezione (QLr) che riproduce le condizioni degli enti di linea e delle stazioni da esso gestite.

### **3.5 L'organizzazione della dirigenza movimento**

La complessità delle operazioni che il personale deve svolgere per garantire la sicurezza della circolazione sia in stazione che in piena linea rende indispensabile una rigorosa organizzazione dell'esercizio ferroviario nella sua totalità, organizzazione dalla quale prescinde in maniera indissolubile la sicurezza stessa.

Pertanto, per ogni figura professionale sono definiti compiti, competenze e responsabilità per fare in modo che siano scongiurati il rischio di equivoco ed indecisione su cosa fare e su chi debba farlo sia nel regolare svolgimento dell'esercizio, che soprattutto in condizioni di emergenza.

Non a caso l'organizzazione ferroviaria nel nostro Paese, come in tutta Europa e negli USA, deriva da quella di stampo tipicamente militare sia per esigenze pratiche che per il contesto storico in cui nasce la ferrovia stessa e non a caso la scelta del termine "regime" di esercizio risulta appropriata per sottolineare l'organizzazione gerarchica delle diverse figure professionali e del *modus operandi*.

Risulta indispensabile definire, se pur in linea generale, le diverse figure professionali prima di passare alla descrizione dei diversi regimi di esercizio cioè dei diversi modi di organizzazione dell'esercizio ferroviario.

Per chiarezza espositiva è possibile suddividere il personale in:

- Personale costituito da agenti dell' Impresa ferroviaria;
- Personale costituito da agenti del Gestore dell'Infrastruttura.

Per l'Impresa ferroviaria sono distinte due categorie di figure professionali: il cosiddetto *Personale di Macchina* (PdM) ed il cosiddetto *Personale di Scorta* (PdS).



Il personale di macchina è costituito dagli operatori che nel gergo pratico ferroviario sono chiamati *Macchinisti*; essi hanno il compito di guidare il veicolo e controllarne le condizioni di efficienza durante la marcia. Quindi, su ogni convoglio, a meno di sistemi completamente automatizzati, è sempre presente un Macchinista nella cabina di guida.

Il personale di scorta è organizzato in *squadre di scorta* ed ha il compito, appunto, di scortare il convoglio durante la marcia; una squadra di scorta è costituita da un *Capotreno* e da diversi *Conduttori*.

Il Capotreno è il soggetto coordinatore e responsabile della squadra di scorta cioè i Conduttori eseguono le diverse attività (servizi di bordo ed attività in stazione per la circolazione) sotto la sua direzione. È formalmente responsabile di ogni decisione sulle azioni da intraprendere durante lo stazionamento per il servizio di salita/discesa passeggeri (ad esempio, comanda al macchinista la chiusura delle porte se non automatizzata), nonché sulle azioni da intraprendere in caso di circolazione in condizioni anomale per garantire la sicurezza. Il Capotreno svolge anche una funzione di assistenza al Macchinista, ad esempio in caso di malore, o in caso di necessità varie, come ad esempio la manovra dei freni di emergenza.

Quando non è presente il Capotreno, ad esempio sui convogli per il trasporto esclusivo di merci o nei sistemi di circolazione automatizzati, le sue funzioni sono svolte direttamente dal Macchinista.

I Conduttori espletano sia attività inerenti il servizio di bordo, come ad esempio la convalida dei titoli di viaggio e l'assistenza e controllo della clientela a bordo, che attività per la circolazione nelle località di servizio come i diversi controlli ed operazioni per la partenza (incarozzamento viaggiatori, operazioni di manovra, ecc.).

Il personale del Gestore dell'Infrastruttura si caratterizza per due figure professionali che spesso sono confuse: il Capo Stazione (CS) ed il Dirigente Movimento (DM).

Il Dirigente Movimento regola ed è responsabile della circolazione dei convogli in una stazione o posto movimento se non è previsto un impianto di comando e controllo a distanza; in sostanza il DM è responsabile e si occupa di comandare e controllare lo svolgimento del ciclo delle attività connesse ad una manovra o istradamento e di modificare la sede degli incroci, assieme ai DM delle altre stazioni, se necessario. Il DM non è un agente esecutivo cioè non espleta le attività manuali necessarie per una manovra che sono svolte, invece, da deviatori, guardablocco, ecc. oppure automatizzate.

I compiti di un DM possono essere ripartiti tra più operatori all'aumentare delle dimensioni dell'impianto e si avranno, allora, un DM esterno, interno, dirigente o regolatore delle manovre, ecc.

Il Capo Stazione, invece, è una figura professionale che si distingue dal DM in quanto può svolgere anche altre attività non pertinenti la sicurezza della circolazione. Ad esempio, nelle stazioni di

piccole e medie dimensioni, può svolgere funzioni riguardanti la parte commerciale come la vendita dei titoli di viaggio e degli abbonamenti ed in tal caso ha il compito di tenere la contabilità dell'attività di vendita e di versare i ricavi all'Impresa Ferroviaria ed, ancora, può svolgere funzioni riguardanti l'assistenza alla clientela, compresa l'informazione sugli orari e sulle coincidenze. Mentre per le stazioni più grandi il CS gestisce la modulistica da consegnare al Personale di Macchina ed al Personale di Scorta necessaria per il tragitto. Siccome la sicurezza in piena linea dipende dal contenuto informativo di questi moduli, il CS ha una responsabilità tale da rendere necessari specifici corsi di formazione con esami abilitanti per poter svolgere tale mansione.

In definitiva, il CS è responsabile direttamente ed indirettamente di tutto ciò che avviene nell'ambito della stazione cioè è la figura di riferimento per tutte le altre subordinate.

Se una località di servizio è sprovvista sia di CS che di DM viene definita *impresenziata* cioè priva di agenti del Gestore dell'Infrastruttura. Tale definizione non è da confondersi con quella di stazione *disabilitata*, in tal caso infatti per la stazione è sospeso, momentaneamente o permanentemente, il servizio movimento cioè la stazione può essere attraversata da un convoglio, con o senza fermata, ma non è abilitata ad essere sede di incroci, manovre o precedenza. Dunque, la condizione di impresenziamento non implica che una stazione sia anche disabilitata e viceversa. È diffusa nel linguaggio ferroviario la locuzione di *Personale di Stazione* con cui si indicano sia gli operatori del Gestore dell'Infrastruttura che quelli dell'Impresa Ferroviaria cioè tutti gli operatori che svolgono attività in ambito stazione.

Nel linguaggio tecnico ferroviario il termine *Movimento* indica una funzione dell'organizzazione dell'esercizio ferroviario; il movimento include la circolazione in linea, in stazione e le attività di manutenzione del materiale rotabile ed è oggi un ambito di competenza dell'Impresa Ferroviaria.

Per quanto concerne l'organizzazione della circolazione in stazione vi sono due concezioni differenti che si sono succedute nel tempo:

- basata sul decentramento;
- basata sull'*accentramento*.

Se si adotta un'organizzazione decentrata la sicurezza della circolazione è sotto la responsabilità di agenti esecutivi (guardablocco, deviatori, ecc.) che si occupano di svolgere tutte le varie attività correlate come il distanziamento treni, la verifica degli itinerari di stazione, la manovra dei segnali. Con tale organizzazione il Dirigente Movimento subentra come garante della sicurezza solo in circostanze che esulano dal regolare servizio cioè quando è necessario spostare gli incroci, effettuare treni straordinari o soppressioni, coordinare le attività e fornire le indicazioni a tutti gli operatori in caso di guasti vari.

Se si adotta un'organizzazione accentrata, invece, le funzioni per garantire la sicurezza della circolazione in stazione sono concentrate, appunto, nell'operato del Dirigente Movimento; naturalmente il livello di accentramento di tali funzioni dipende innanzitutto dalla possibilità fisiologica di un singolo operatore di eseguire le varie attività, ma in gran parte anche dalle tecnologie di comando e controllo di cui egli può disporre per governare gli enti di piazzale.

La stessa logica di decentramento o accentramento è stata estesa anche all'organizzazione delle linee ferroviarie ed un *regime di esercizio* descrive proprio l'organizzazione della circolazione su una linea e nelle sue stazioni.

In Italia i regimi centralizzati di esercizio iniziano a diffondersi negli anni '20: infatti, fino ad allora ciascuna località di servizio era gestita da un proprio Dirigente Movimento e lo scambio di informazioni avveniva sostanzialmente tra due DM di località limitrofe. Con tale organizzazione decentrata era impensabile ottenere una visione d'insieme della linea e ciò comportava che i provvedimenti adottati da ciascun DM fossero dettati da motivazioni derivanti dalle esigenze o difficoltà particolari del proprio impianto e comportassero, invece, un disturbo per la regolarità dell'esercizio con conseguenti ritardi.

Con l'aumentare del numero di convogli in circolazione su una stessa linea si rende subito necessario pensare ad un sistema organizzativo che consenta di coordinare gli agenti delle varie stazioni, di ottenere, cioè, quella visione d'insieme, o meglio, *di sistema* di una linea ferroviaria.

Come sarà evidente nel seguito, i diversi regimi di esercizio si differenziano proprio in base al livello di accentramento dell'organizzazione e si distinguono in regimi di esercizio a:

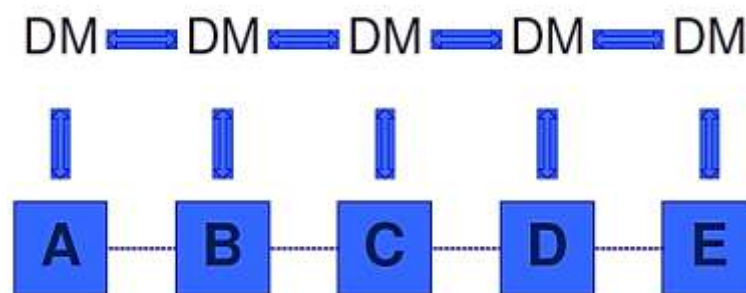
- Dirigenza Locale;
- Dirigenza Centrale;
- Dirigenza Unica;
- Dirigenza Centrale Operativa.

Lo sviluppo dei diversi tipi di organizzazione ha seguito prevalentemente lo sviluppo delle tecnologie che hanno consentito progressivamente di poter effettuare da remoto sempre più attività cioè di aumentare il livello di centralizzazione.

Per descrivere ciascuno di questi regimi di esercizio si fa riferimento allo schema di una linea ferroviaria costituita da due stazioni capolinea (A ed E) e tre località di servizio di linea (B, C, D).

#### Regime di esercizio a Dirigenza Locale

Nel regime di esercizio a Dirigenza Locale (DL) le stazioni o i Posti Movimento sono sempre presenziati da un Dirigente Movimento.



**Figura 77: Schema del regime di esercizio a Dirigenza Locale**

In figura è mostrato uno schema della logica dell'organizzazione di questo regime; ogni DM presidia la propria località di servizio: comanda e controlla i movimenti in stazione ed opera per l'invio ed il ricevimento dei convogli dalle tratte attigue.

Ciascun DM può comunicare direttamente solo con il DM della stazione successiva, infatti tale regime si basa su una tecnologia praticamente ridotta a quella delle comunicazioni a mezzo di telegrafo o di telefono, proprio per questo è il primo regime di esercizio storicamente ad essere stato applicato.

Inoltre, lo scambio di informazioni tra due stazioni non limitrofe, la stazione A ed E ad esempio, è molto laborioso dovendo in realtà consistere in una successione di comunicazioni tra una coppia di DM di stazioni limitrofe in andata ed in ritorno.

Tale regime mostra un'altra debolezza nel caso di interruzione delle comunicazioni, ad esempio della linea telefonica tra D ed E: in tale evenienza la stazione E rimane completamente isolata.

Al diminuire del cadenzamento<sup>15</sup> cioè all'intensificarsi della circolazione questo regime comporta dei perditempo che lo rendono inutilizzabile per un servizio ad alta frequenza, lo stesso accade in caso di circolazione in condizioni degradate in quanto ciascun DM deve assumere le informazioni per regolare il traffico da e per la propria località dalle altre località.

Questo tipo di regime di esercizio è stato il primo ad essere adottato e presenta, infatti, un livello di centralizzazione della dirigenza della circolazione nullo.

Per sua natura può essere associato ai sistemi di blocco privi di impianto di blocco di linea come il regime del bastone pilota, il regime del giunto ed il regime del consenso telegrafico/telefonico o con un impianto di blocco semiautomatico (blocco elettrico manuale) che necessitano tutti di

---

<sup>15</sup> Cadenzamento: Indica l'intervallo di tempo che trascorre tra le partenze di due treni successivi da una stessa località di servizio e verso una stessa località di servizio. Ad esempio, un cadenzamento di 10 minuti per la tratta A-B indica che vi è un treno in partenza da A diretto verso B ogni 10 minuti.

località di servizio presenziate ed, inoltre, le sezioni di blocco devono essere sempre delimitate da due località di servizio.

Nel caso in cui la linea sia attrezzata con un impianto di blocco automatico (blocco elettrico a correnti fisse, blocco elettrico a correnti codificate, blocco conta assi), la presenza dei DM nelle località di servizio è comunque necessaria per gestire la circolazione in stazione cioè svolgere le fasi per gli itinerari e gli istradamenti.

Se le località di servizio sono, a loro volta, dotate di un apparato centrale elettrico o elettronico (ACEI o ACS) ciascun DM è assistito nello svolgimento delle sue funzioni dall'interfaccia sicura con gli enti di piazzale. Tuttavia, disponendo di tali tecnologie risulta sconveniente disporre un DM in ciascuna località di servizio: infatti, in tal caso è sufficiente che vi sia un unico operatore DM che da un posto centrale può controllare in remoto la circolazione in linea e nelle stazioni.

Grazie al progresso tecnologico e a causa della cronica necessità di ridurre le spese di esercizio, tale regime è, ad oggi, completamente in disuso soprattutto per il cospicuo numero di operatori necessario e permane solo sulle linee a scarso traffico.

#### Regime di esercizio a Dirigenza Centrale

Dall'esame delle criticità mostrate dal regime di esercizio a Dirigenza Locale, è stato successivamente introdotto il regime a Dirigenza Centrale (DC). Con tale regime vengono centralizzate le funzioni di decisione e comando, ma non quella di controllo; infatti, esso prevede che vi sia un Dirigente Centrale che svolge la funzione di coordinatore di più Dirigenti Movimento: il dirigente centrale può assumere decisioni ed impartire comandi che, tuttavia, non sono sicuri. I comandi vengono eseguiti in sicurezza dai DM di ciascuna località di servizio.

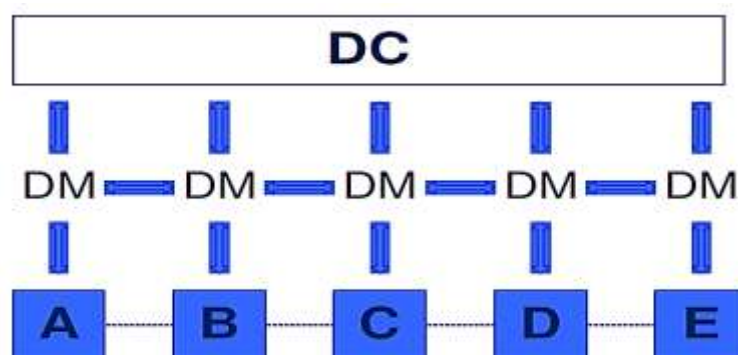
In tale regime, dunque, viene centralizzata la funzione di comando, ma non quella di controllo che deve essere svolta comunque dai DM. In base alle informazioni trasmesse dai DM, il DC stabilisce le sedi di incroci e precedenza e coordina tutta la linea nel caso di interruzione di binario ed i DM svolgono una funzione di interfaccia sicura tra il DC e gli enti di piazzale. Anche tale regime presuppone un livello tecnologico molto basso (telegrafo o telefono).

La Dirigenza Centrale può essere di due tipi:

- Consultiva;
- Imperativa.

Nel caso di dirigenza consultiva il Dirigente Centrale fornisce suggerimenti ai Dirigenti Movimento per migliorare le condizioni della circolazione, mentre nel caso di dirigenza imperativa

il Dirigente Centrale impartisce ordini ai Dirigenti Movimento, che tuttavia li eseguono sempre a condizione che siano verificate tutte le condizioni di sicurezza necessarie.



**Figura 78: Schema del regime a Dirigenza Centrale**

Sicuramente, la presenza di un coordinatore a velocizzato lo scambio delle informazioni, ridotto i perditempo ed eliminato il rischio di avere località di servizio isolate in caso di guasto agli impianti di telecomunicazione rendendo tale regime adatto anche per linee ad intenso traffico. Infatti, il Dirigente Centrale compila un orario grafico in base alle ore di arrivo, di partenza e di transito dei treni che gli vengono comunicate dai DM e grazie a tale grafico può stabilire rapidamente le sedi di incrocio e di precedenza più idonee a fluidificare la circolazione.

Tuttavia, tale regime di esercizio non consente alcuna riduzione dell'organico necessario, ma anzi ne comporta un incremento.

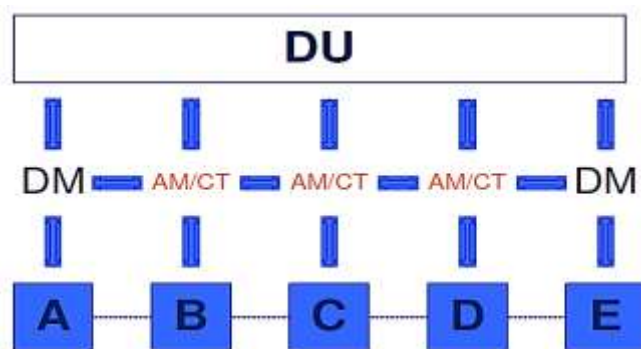
Per sua natura può essere associato ai sistemi di blocco privi di impianto di blocco di linea come il regime del bastone pilota, il regime del giunto ed il regime del consenso telegrafico/telefonico.

Nel caso in cui la linea sia attrezzata con un impianto di blocco automatico (blocco elettrico a correnti fisse, blocco elettrico a correnti codificate, blocco conta assi), la presenza dei DM nelle località di servizio sarebbe giustificata solo per garantire la sicurezza della circolazione in stazione ma è intuitivo concludere che se le località di servizio sono, a loro volta, dotate di un apparato centrale elettrico collegato al posto centrale del DC (ACEI o ACS) tale presenza è ridondante. Infatti, l'introduzione di un apparato centrale elettrico o statico consente di introdurre un'interfaccia sicura tra il Dirigente Centrale e gli enti di piazzale.

Da queste considerazioni emerge, ancora una volta, il legame molto stretto tra regime di esercizio e tecnologia disponibile: un collegamento telegrafico o telefonico non può creare un'interfaccia sicura tra DC, piazzali e piena linea mentre è possibile realizzarlo con un complesso sistema di collegamenti di sicurezza (a mezzo di circuiti elettrici, relè, ecc.).

## Regime di esercizio a Dirigenza Unica

Conservando l'impostazione del regime a Dirigenza Centrale, ma limitando il Personale di Stazione è stato ideato il regime di esercizio a Dirigenza Unica (DU). Tale regime nasce proprio per le linee a scarso traffico per ridurre le spese di esercizio.



**Figura 79: Schema del regime di esercizio a Dirigenza Unica**

Sulle linee a scarso traffico è possibile, infatti, eliminare i DM delle località intermedie affidandone la dirigenza ad un Dirigente Unico che può comunicare anche con i DM delle stazioni capolinea. Le funzioni svolte dai DM eliminati sono svolte dal Personale di Scorta cioè dal Capotreno (CT) oppure da Aiutanti Movimento (AM) che presenziano le località di servizio intermedie occupandosi sostanzialmente della compilazione dei dispacci scambiati con il DU, ma che hanno un grado di qualifica inferiore a quella di Dirigente Movimento.

In questo caso sia l'AM che il CT devono sempre chiedere il consenso di via libera al DU prima di poter istradare il convoglio in piena linea: il Dirigente Unico, per suo conto dal posto centrale, compila un grafico in base alle informazioni che gli vengono comunicate dalle località di servizio ed alle caratteristiche cinematiche dei convogli; grazie al grafico ha sempre una visione d'insieme della circolazione su tutta la linea e la può regolare direttamente cioè accordando o meno la partenza di un convoglio da una località di servizio seguendo dalla sua postazione l'andamento dei treni.

Anche per questo regime di esercizio è sufficiente un impianto telegrafico o telefonico per le telecomunicazioni.

Si fa notare che, anche in questo caso, l'interfaccia sicura tra il Dirigente Unico e gli enti di piazzale deve essere garantita dai DM per le stazioni capolinea e dagli AM o dai CT per le stazioni intermedie e che, quindi, è centralizzata solo la funzione di comando, ma non quella di controllo.

Nel caso in cui il Dirigente Unico si avvalga della collaborazione dei Capotreno i perditempo sono notevoli in quanto il Capotreno deve scendere dal convoglio, recarsi nella cabina movimento e

mettersi in contatto con il DU; pertanto, tale regime può essere adottato solo sulle linee a scarso traffico.

Questo regime si sposa perfettamente con i sistemi di circolazione privi di qualsiasi impianto di blocco in linea essendo necessaria solo una tecnologia per effettuare le comunicazioni a distanza che può consistere anche in un semplice telegrafo.

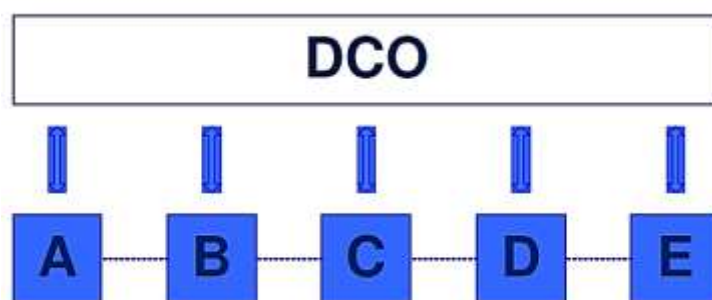
#### Regime di esercizio a Dirigenza Centrale Operativa e Comando Centralizzato del Traffico (CTC)

Dall'analisi dei precedenti regimi di esercizio è emerso che i punti critici nell'organizzazione consistono nella necessità di avere un'interfaccia sicura tra il posto di comando ed il piazzale di stazione e la necessità di creare una rete di comunicazione tra le diverse località di servizio ed, eventualmente, tra queste ed un posto centrale. In sostanza, entrambi questi due punti possono essere riassunti in un unico punto critico: la necessità dello scambio di informazioni sicure.

Il regime di esercizio a Dirigenza Centrale Operativa si differenzia dai precedenti in quanto prevede che sia centralizzata anche la funzione di controllo, oltre che quella di comando cioè che lo scambio di informazioni tra posto di comando e posti periferici sia biunivoco.

Naturalmente questo è reso possibile da un impianto di telecomando e telecontrollo della circolazione in linea ed in stazione definito *Centralized Traffic Control* (CTC) che tradotto dall'inglese sta per *Comando Centralizzato del Traffico*.

Il CTC consente di eliminare il livello di operatività interposto tra località di servizio e posto centrale: il Dirigente Centrale dal posto centrale regola la circolazione dei treni cioè controlla e comanda direttamente, anziché trasmettere indicazioni alle località di servizio in cui poi i comandi dovrebbero essere attuati da DM, AM o CT.

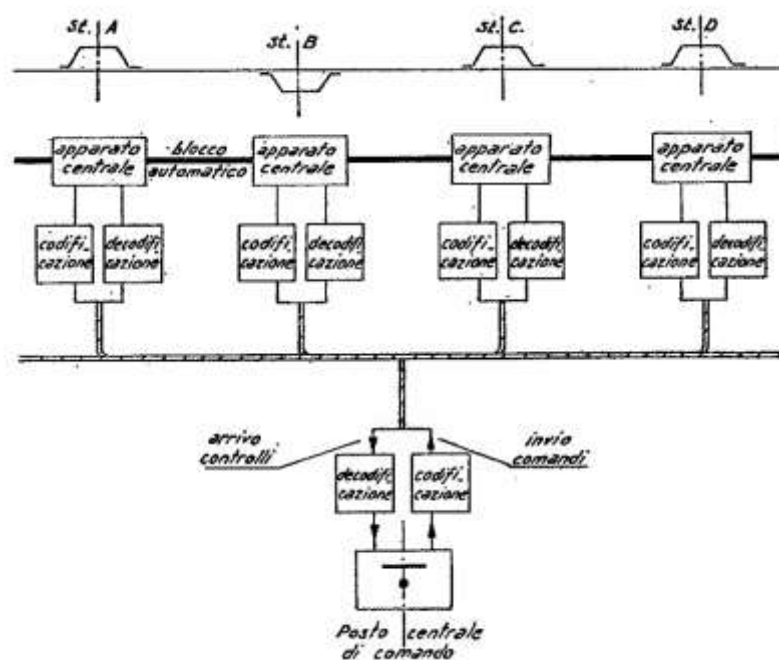


**Figura 80: Schema del regime di esercizio a Dirigenza Centrale Operativa**



Con un impianto CTC, allora, il Dirigente Centrale diviene “operativo” cioè in grado non solo di rilasciare il consenso per la partenza, ma anche di comandare in sicurezza, cioè con un feedback, direttamente gli enti di piazzale (deviatori e segnali).

Per descrivere in che modo un DCO sia in grado di comandare e controllare una linea intera si consideri la seguente figura:



**Figura 81: Schema di un impianto di CTC**

Nel regime a Dirigenza Centrale Operativa una linea viene suddivisa in sezioni ciascuna posta sotto la giurisdizione di un Dirigente Centrale Operativo (per le linee di modesta estensione esiste un unico DCO che opera da un unico posto centrale): egli dal posto centrale telecomanda gli enti di piazzale e segue l’andamento della circolazione in linea e nelle località di servizio grazie ad un quadro luminoso che riproduce schematicamente i binari di linea e di stazione. Tutti i segnali, sia quelli di protezione delle stazioni che quelli di blocco intermedi, sono dotati di telefono grazie al quale il Personale di Scorta può comunicare con il DCO in caso di anomalità.

Le località di servizio di una sezione con CTC possono essere gestite con due diversi regimi:

- *Regime di telecomando*, in tal caso le località intermedie sono impresenziate e dotate di un apparato centrale elettrico (ACEI o ACS) che è telecomandato dal DCO nel posto centrale. L’apparato centrale elettrico è dotato di comandi locali di emergenza che possono essere, eventualmente, azionati dal Capotreno in caso di guasto del collegamento con il posto centrale.

- *Regime del teleconsenso*, in tal caso le località intermedie sono presenziate da un DM che opera su un apparato centrale elettrico (ACEI o ACS) per comandare gli enti di piazzale, ma che deve richiedere il consenso per l'inoltro treno al DCO.

Si consideri, allora, una sezione posta sotto il controllo di un DCO e si supponga che sia costituita da quattro località di servizio A, B, C e D.

Le stazioni che delimitano una sezione di linea gestita con un impianto CTC sono denominate *stazioni porta* (A e D in figura) e sono sempre presenziate da un DM che deve richiedere il consenso al DCO per inviare un convoglio nella sezione.

Dal posto centrale il DCO invia comandi (non sicuri in quanto le condizioni di sicurezza sono verificate dagli AC in stazione) e riceve l'esito dei controlli: la trasmissione dei comandi e dei controlli avviene mediante correnti codificate che utilizzano linee di tipo telefonico. Le località di servizio sono spesso definite *posti satellite* mentre gli apparati centrali intesi come impianti sono definiti *posti periferici*.

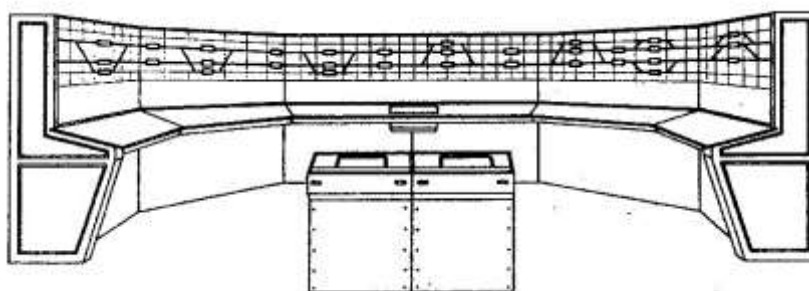
Un impianto di CTC richiede di attrezzare la linea con un impianto di blocco automatico se si vogliono rendere impresenziate tutte le località di servizio intermedie o perlomeno di un blocco semiautomatico se è previsto il presenziamento con DM.

In sostanza, la sicurezza dell'esercizio con un impianto CTC è garantita da due impianti necessari e sufficienti: apparati centrali e blocco automatico (o semiautomatico). Il blocco automatico o semiautomatico di linea è indispensabile per trasmettere al posto centrale lo stato delle sezioni di blocco; in realtà lo stato di ogni sezione di blocco è trasmesso sia all'apparato centrale attiguo che ne usufruisce per la formazione degli itinerari di partenza o transito dei convogli che al posto centrale.

La sala operativa del posto centrale è dotata del banco di manovra provvisto degli organi di comando; tali organi possono essere pulsanti, levette o tastiere alfanumeriche per impartire i comandi mediante codici (vi sono codici per identificare il posto periferico a cui il comando è diretto e codici per specificare l'operazione che l'AC locale deve eseguire).

Inoltre, è presente il quadro luminoso che riproduce il piano schematico della linea sul quale sono riportati lo stato dei segnali luminosi, dei deviatori e di ciascuna sezione di blocco della linea.

Nei CTC delle linee ad intenso traffico è prevista anche la visualizzazione del numero del treno (*train describer*).



**Figura 82: Sala operativa di un posto centrale in CTC**

I vantaggi di un impianto CTC consistono nel:

- Ridurre i costi di esercizio grazie alla riduzione dell'organico per l'impresenziamento, permanente o temporaneo, delle località di servizio intermedie;
- Aumentare la potenzialità di una linea grazie alla riduzione dei perditempo nelle località di servizio in cui gli apparati centrali svolgono in automatico tutto il ciclo di fasi per ogni manovra conoscendo in automatico lo stato delle sezioni di blocco attigue;
- Migliorare la regolarità dell'esercizio ferroviario, infatti in caso di saturazione su tratti di linea il DCO può organizzare la circolazione per risanare il suo stato in modo tempestivo conoscendo in tempo reale lo stato di tutta la linea.

### **3.6 Le funzioni di comando e controllo automatico del veicolo e del traffico ferroviario**

Nel settore del trasporto ferroviario europeo le funzioni necessarie a gestire in sicurezza sia la marcia del singolo veicolo che il traffico vengono convenzionalmente raggruppate in quattro categorie indicate come:

- funzioni di Automatic Train Protection (ATP);
- funzioni di Automatic Train Operation (ATO);
- funzioni di Automatic Train Supervision (ATS);
- funzioni di Automatic Traffic Control (ATC).

Tali funzioni sono elencate in ordine crescente di automatizzazione del sistema di trasporto nel suo complesso; ciò significa che se una rete ferroviaria è dotata sia di un sistema di segnalamento che di gestione del traffico che svolgono in modo automatico tutte queste funzioni è possibile operare con convogli privi di conducente cioè operare con guida *driverless*.

Le funzioni di Automatic Train Protection (ATP), Automatic Train Operation (ATO) ed Automatic Train Supervision (ATS) sono indispensabili per realizzare quelle di Automatic Train Control (ATC): sono, infatti, le funzioni di ATC che consentono di realizzare una guida completamente

driverless ed integrabile con i sistemi di segnalamento più innovativi come quelli basati sul blocco mobile (ad esempio il Computer-Based Train Control).

### 3.6.1 Automatic Train Protection (A.T.P.)

In questa sezione si fornisce una descrizione generale delle logiche di sicurezza alla base del funzionamento del sistema di Automatic Train Protection (ATP).

In linea generale è possibile asserire che la sicurezza della marcia dei treni su di una linea ferroviaria è affidata a tre componenti principali:

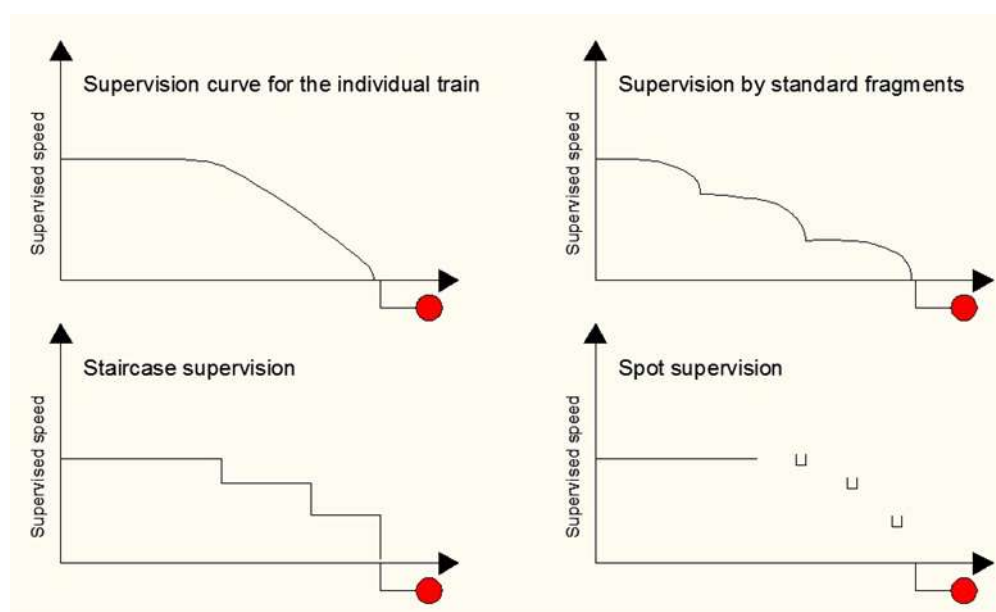
- il segnalamento;
- il sistema A.T.P.;

Le funzioni del sistema ATP sono (in ordine crescente evoluzione del sistema):

- intervention;
- supervision;
- cab signalling;

La funzione base è quella di intervention cioè di azionare in modo automatico una frenatura di emergenza nel caso di superamento di un segnale posto a via impedita (rosso).

La funzione di supervision assiste l'operatore di bordo con messaggi di allarme in caso di superamento della velocità consentita ed opera un monitoraggio più o meno continuo nello spazio della velocità. In particolare, la funzione di supervisione delle manovre di arresto o rallentamento (cd. *target speed monitoring*) può essere svolta utilizzando:



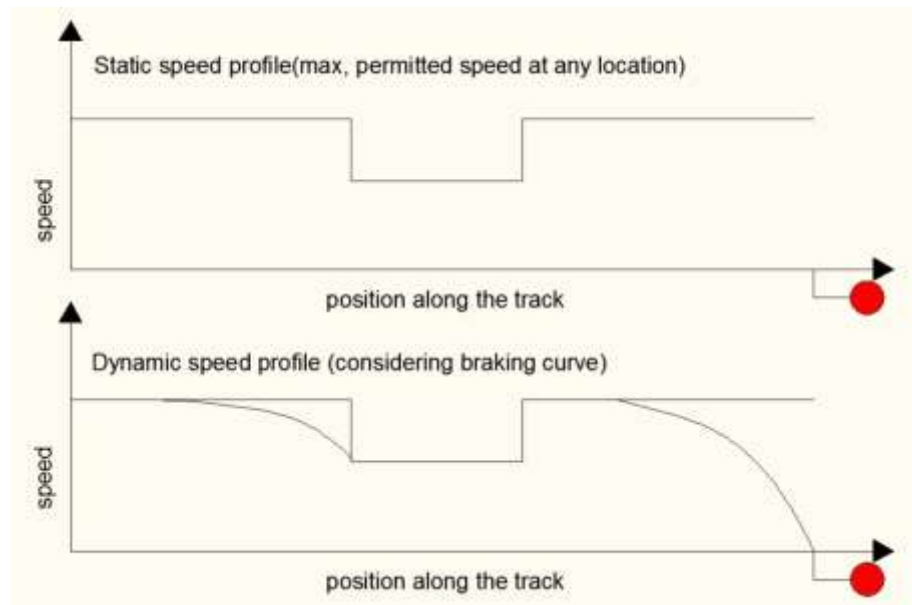
**Figura 83: Profili di decelerazione per la funzione di supervision di ATP (Gregor & Sergej, 2009)**

- *Supervision curve for the individual train*: in tal caso il Sistema ATP elabora una curva di frenatura in base alle caratteristiche fisico-prestazionali del veicolo e del tracciato; in base a tale curva di frenatura deterministica il Sistema ATP effettua la supervision della Marcia del veicolo. I sistemi ETCS Livello 1 e successive utilizzano questo tipo di supervision.
- *Brake supervision by standardized fragments*: la supervisione è svolta utilizzando un set di curve di frenatura precalcolate e diverse in funzione del salto di velocità, di vicinanza al segnale rosso e/o del tipo di convoglio. Un dispositivo di terra segnala al veicolo il cambio di velocità ed il Sistema di bordo seleziona la curva di frenatura idonea. Questo tipo di supervision è tipica nei sistemi ATP con trasmissione discontinua come il sistema tedesco Indusi/PZB 90.
- *Staircase supervision*: la funzione di supervisione del sistema ATP è svolta attraverso un profilo di velocità a scalino come nei sistemi ATP a trasmissione continua come ad esempio i sistemi a correnti codificate (l'italiano *BACC*). Ogni valore di velocità è valido per l'intera lunghezza del circuito di binario.
- *Spot supervision*: la funzione di supervisione è realizzata monitorando la velocità attuata dal veicolo solo in alcuni punti dello spazio. La velocità massima, naturalmente, decresce man mano che si avanza verso il segnale di arresto.

La funzione di cab signalling, infine, consiste nel trasmettere direttamente in cabina le informazioni necessarie per la guida in sicurezza del veicolo. La quantità di informazioni trasmesse varia da sistema a sistema, ma al limite l'informazione sempre trasmessa è l'aspetto del segnale cioè di velocità consentita (Gregor & Sergej, 2009). I messaggi riprodotti in cabina di guida possono essere sia visivi che acustici. In particolare si distinguono:

- *Non-selective warning signals* (principalmente acustici): nel caso in cui il veicolo oltrepassi un punto particolare, ad esempio un segnale secondario, viene emesso un segnale acustico per catturare l'attenzione del macchinista. Tale tipo di messaggio non fornisce informazioni sull'aspetto del segnale.
- *Selective warning signals* (principalmente acustici): un messaggio acustico viene riprodotto in cabina in caso di superamento di un segnale che impone l'inizio di un rallentamento.
- *Visual repetition of trackside signals*: l'aspetto di un segnale viene anticipato in cabina. In tal caso si ha la funzione di cab signalling.
- *Continuous static speed information*: in tal caso è visualizzato non solo l'aspetto del segnale, ma anche la velocità massima consentita sulla tratta in funzione di tutte le limitazioni derivanti dal tracciato e dal segnalamento.

- *Dynamic speed information*: in tal caso viene calcolato anche il profilo di decelerazione nei punti di riduzione della velocità. In tal modo la marcia è supervisionata con continuità anche nelle zone di transizione prevenendo il rischio di superamento della velocità massima consentita nella tratta successiva.



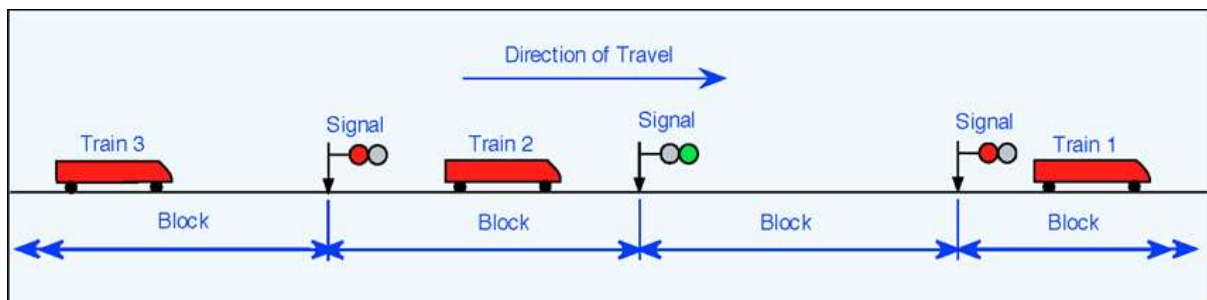
**Figura 84. Funzione di supervisione di ATP: Statit Speed Profile e Dynamic Speed Profile (Gregor & Sergej, 2009)**

Come già ampiamente anticipato nei paragrafi precedenti, il segnalamento basato sul distanziamento ad intervalli di spazio prevede che la linea sia suddivisa in sezioni di blocco e che ciascuna sezione sia protetta da un segnale luminoso. Su una linea così strutturata si applica la cosiddetta *Teoria del blocco*: la distanza di sicurezza tra convogli è garantita dalla condizione che ogni sezione di blocco possa essere occupata da un solo veicolo alla volta, che l'ingresso in ogni sezione sia regolato da un segnale luminoso che, all'occorrenza, ne impedisca l'accesso a qualsiasi altro veicolo e che la lunghezza minima di ogni sezione sia pari alla distanza di arresto.

L'informazione più essenziale che un segnale possa trasmettere ad un veicolo in transito è sostanzialmente un comando di:

- via libera, cioè di procedere alla velocità massima consentita sulla tratta;
- via occupata, cioè di iniziare una manovra di arresto e raggiungere al termine della sezione di blocco velocità nulla in quanto la sezione successiva è già occupata da un altro veicolo.

Infatti, originariamente il segnalamento si basava sul semplice sistema a 2-aspetti (rosso/verde) come mostrato nella seguente figura:



**Figura 85: Segnalamento a due aspetti (rosso/verde)**

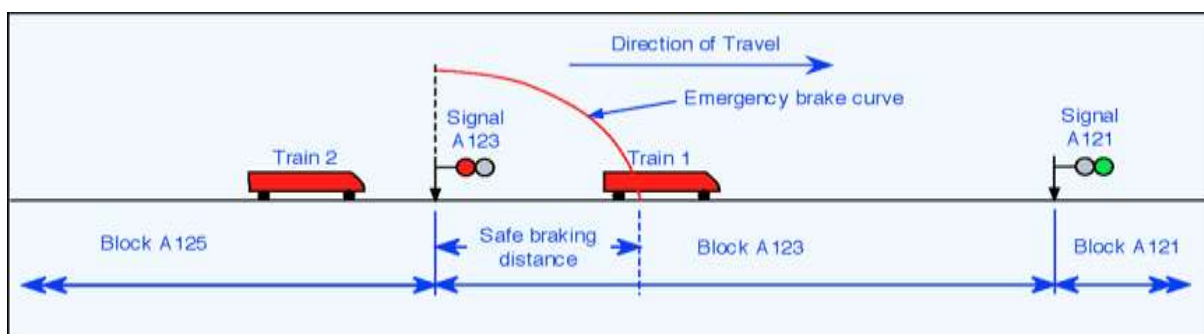
È facile intuire che condizione necessaria, ma non sufficiente affinché un segnale sia posto a via libera (verde) è che la sezione di blocco da esso protetta sia sgombrata da altri convogli.

Un sistema di Automatic Train Protection prevede l'utilizzo di dispositivi e tecnologie che riducano il rischio di errore umano nella lettura dell'aspetto dei segnali luminosi. Non a caso è un sistema che nasce nel settore metropolitano in cui i tratti in galleria sono numerosi o costituiscono la totalità della linea.

In generale, l'apparecchiatura ATP consente la trasmissione dell'aspetto dei segnali dai binari al convoglio e, in alcuni casi, anche dei limiti di velocità associati ai vari tratti di binario.

La funzione base del sistema ATP è quella di azionare una frenatura di emergenza nel caso di superamento di un segnale posto a via impedita (rosso). Ciò è reso possibile da un'attrezzatura installata a bordo che confronta la velocità di marcia del veicolo con quella consentita sulla sezione e comanda automaticamente una manovra di decelerazione all'occorrenza.

Tuttavia, se il sistema ATP è dotato della sola funzione base non è in grado di impedire in modo assoluto la collisione tra questo convoglio ed uno che si trova immediatamente a valle del segnale oltrepassato. In sostanza, ciò equivale a dire che non è sufficiente far scattare la frenata d'emergenza appena il convoglio supera il segnale posto a via impedita in quanto la distanza necessaria all'arresto (contingente) potrebbe risultare minore del distanziamento effettivo tra i due convogli. La seguente figura mostra una situazione in cui il Treno 1 è fermo ed il Treno 2 non ha un distanziamento sufficiente per evitare la collisione:



**Figura 86: Criticità del segnalamento a due aspetti (rosso/verde)**

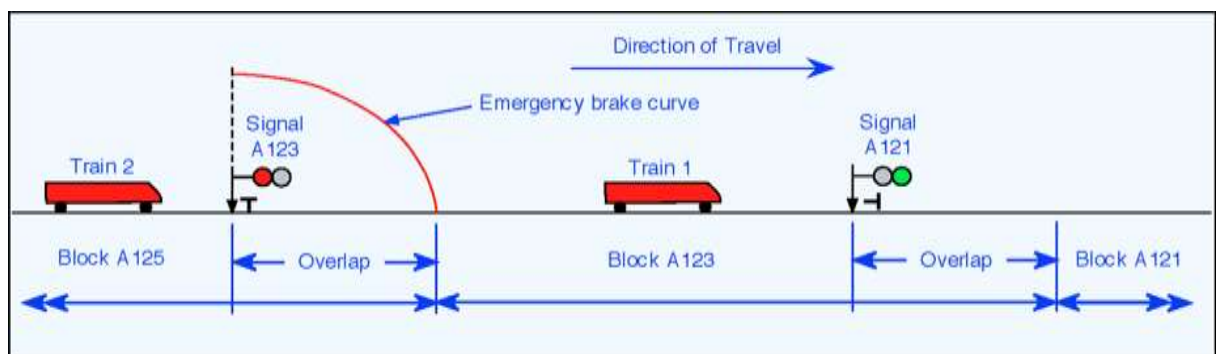
Quindi, un sistema di segnalamento così progettato presenterebbe due aspetti critici:

- se il veicolo a valle si trova ad una distanza dal segnale minore della distanza necessaria al completo arresto non è possibile evitare la collisione;
- presuppone che il veicolo follower inizi a frenare esattamente nel punto in cui è in grado di vedere il segnale rosso.

Per risolvere queste due criticità è stato introdotto il concetto di *overlap*: come mostrato nella seguente figura, affinché il segnale A123 sia verde è necessario che il treno 1 abbia liberato sia con la testa che con la coda non solo la sezione di blocco compresa tra i segnali A123 ed A121, ma anche il tratto a valle del segnale A121 indicato overlap. Tale tratto è pari alla distanza di arresto di emergenza ed è così chiamato in quanto in realtà la sezione protetta dal segnale A123 si sovrappone per un tratto a quella protetta dal segnale A121.

Il valore della distanza di arresto cioè dell'overlap dipende da diversi fattori: la pendenza della tratta, la velocità iniziale del veicolo cioè la velocità massima di ingresso nella sezione di blocco, la decelerazione massima di emergenza consentita da norma per garantire la sicurezza dei passeggeri, la percentuale di massa frenata del convoglio, le condizioni di aderenza, ecc.

Il primo dispositivo utilizzato per realizzare la funzione base dell'ATP è a funzionamento meccanico e consiste in una semplice barra metallica (cd. *tripper*) posta in prossimità di ciascun segnale e che può assumere una posizione sollevata se il segnale è rosso oppure ribassata se il segnale è verde.



**Figura 87: L'overlap tra sezioni di blocco**

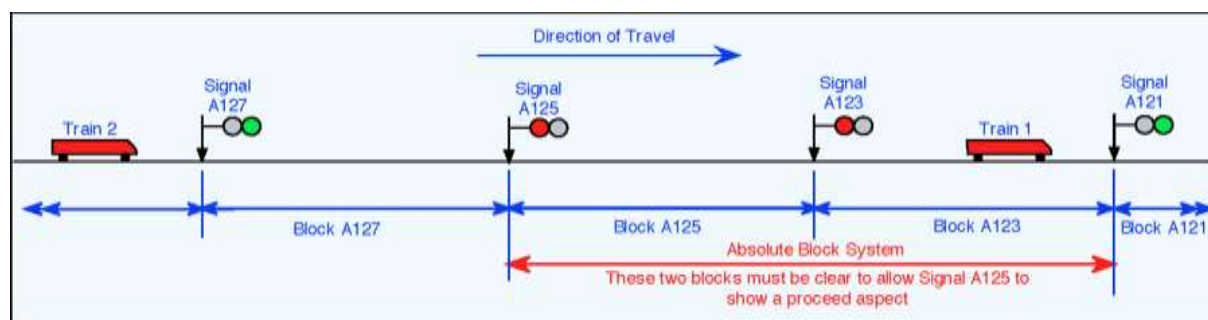
Se il Treno 2 oltrepassa il segnale A123 rosso, il tripper sollevato (mostrato in figura come una “T” alla base del segnale A123) rompe un dispositivo apposito presente sul veicolo ed innesca la frenata di emergenza.

Nel caso in cui le sezioni di blocco hanno lunghezza pari alla distanza di arresto, anche l'overlap diviene una sezione di blocco a tutti gli effetti. In tal caso, il distanziamento a blocco fisso



(*absolute block*) prevede che vi sia sempre una sezione di blocco completamente sgombera tra due veicoli successivi.

La seguente figura mostra come nella circostanza in cui il Treno 1 sia fermo nella sezione di blocco A123 i due segnali a monte siano posti a via impedita in modo tale che il Treno 2 possa sfruttare la sezione di blocco A125 per arrestarsi.



**Figura 88: Il distanziamento con blocco fisso**

Per garantire che un segnale sia verde solo se anche l'overlap ed esso relativo sia completamente libero vengono, quindi, adottati dei dispositivi di campagna (ad esempio circuiti di binario, pedali conta assi, ecc) che rilevino la posizione e l'integrità dei veicoli in transito.

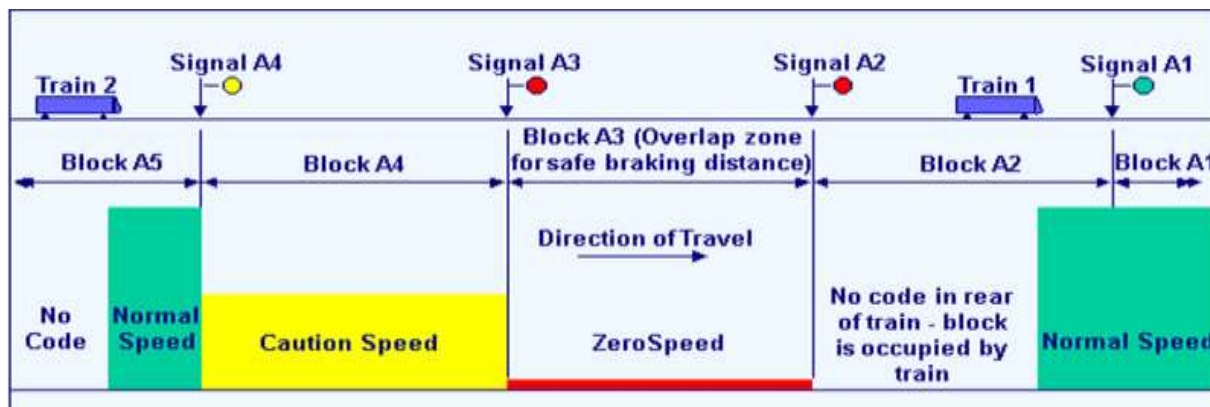
Il sistema ATP è, a sua volta, distinto in due sottosistemi costituiti da componenti diverse ed aventi diverse funzionalità:

- A.T.P. continuo;
- A.T.P. discontinuo.

Le funzioni svolte da un sistema ATP e la tecnologia impiegata possono essere diverse a seconda dell'azienda produttrice; in genere, l'ATP prevede una trasmissione di informazioni tra terra e bordo in modo continuo e discontinuo.

### **3.6.1.1 ATP con trasmissione continua**

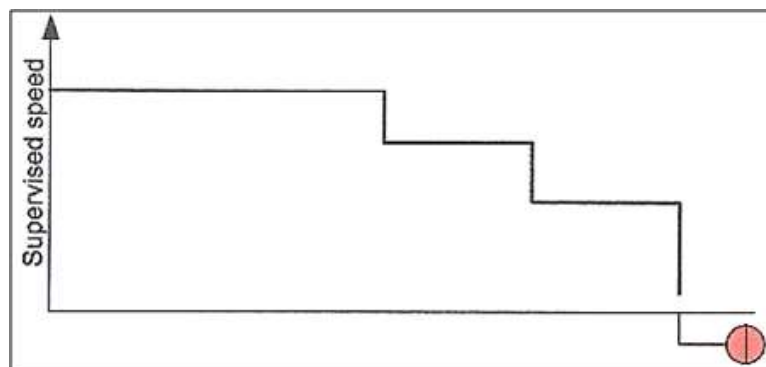
Per realizzare la trasmissione continua delle informazioni terra-bordo si ricorre alle cosiddette *correnti codificate*: le indicazioni di segnale sono trasmesse direttamente in cabina cioè viene attuata la funzionalità di cab signalling. Su una linea attrezzata con ATP continuo con correnti codificate, come nel caso mostrato nella seguente figura, ogni sezione di blocco è caratterizzata da un codice elettronico cui corrisponde un preciso valore di velocità da attuare cioè da una corrente codificata circolante nel circuito di binario della sezione:



**Figura 89: ATP con trasmissione continua**

In funzione della velocità massima di linea, sono previsti tre o più codici di velocità: in figura è mostrato un esempio di ATP continuo con tre codici di velocità: normale (Normal Speed) cioè quella massima consentita sul tratto, di avvertimento (Caution Speed) che impone una decelerazione fino ad un valore di velocità prestabilito (che anticipa sempre un segnale rosso) e di velocità nulla (Zero Speed).

Il sistema ATP basato su una funzione di supervision attraverso una funzione “a scalino” della velocità è definito *Speed Steps ATP*:



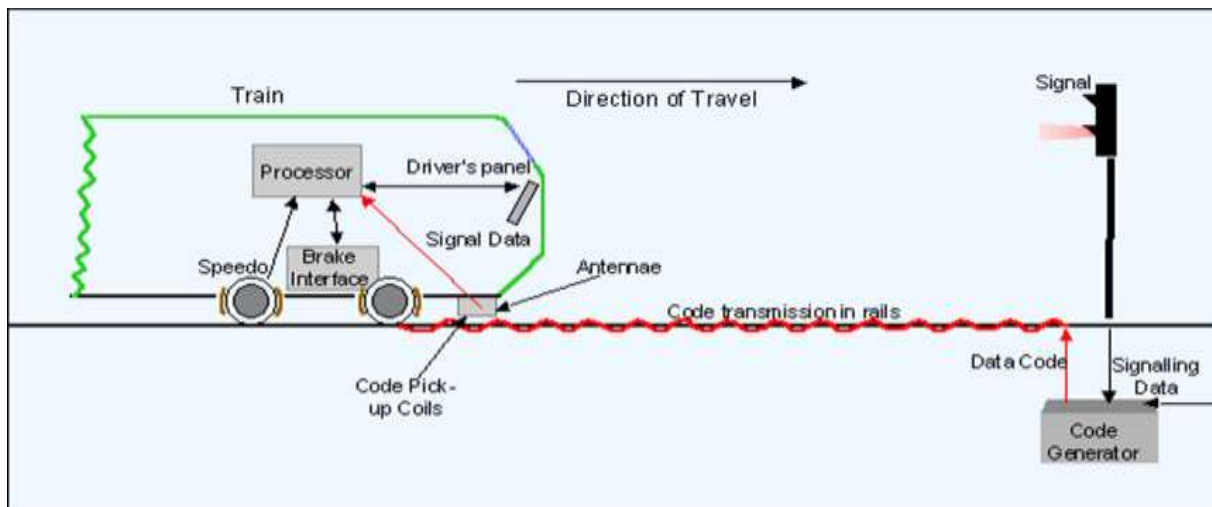
**Figura 90: ATP con supervisione a mezzo di curva di frenatura a scalino** (Gregor & Sergej, 2009)

Il sistema ATP con trasmissione continua trasmette a ciascun veicolo:

- lo stato della linea a valle (aspetto del segnale);
- la velocità ammissibile sulla tratta attraversata;
- la velocità da attuare nel punto di ingresso della tratta successiva.

Lo stato dei segnali di linea viene trasformato in un codice elettronico da un dispositivo (in figura indicato come *code generator*) e trasmesso attraverso le rotaie. Questo codice è, quindi, captato da

un'antenna installata sulla parte bassa della cassa del veicolo in corrispondenza della cabina di comando.



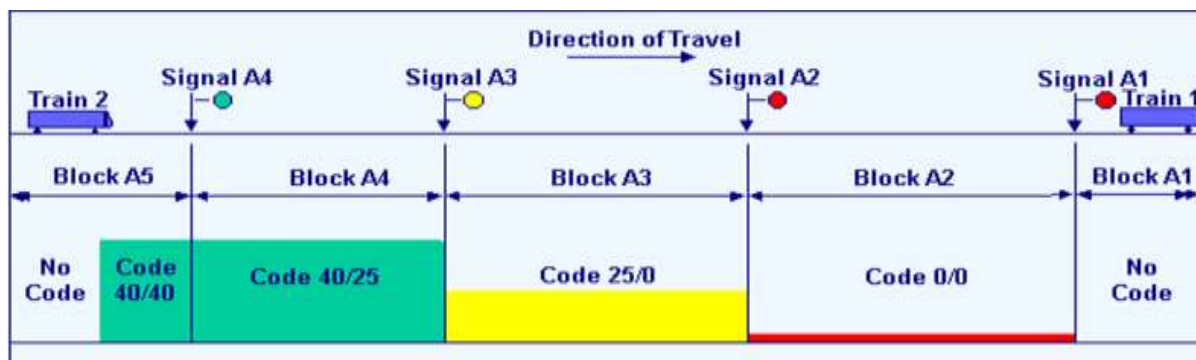
**Figura 91: Trasmissione continua a mezzo di correnti codificate**

I dati captati dalle antenne (bobine eccitate dalla corrente circolante sulle rotaie) sono trasferiti ad un decodificatore ed ad un processore a logica di sicurezza installati a bordo. La velocità di marcia del convoglio è confrontata con quella consentita nella sezione come specificato dal codice intercettato e nel caso in cui risultasse superiore il processore comanderebbe la frenata d'emergenza. I dati trasmessi al processore di bordo includono anche informazioni sulla distanza tra il veicolo ed il punto di arresto istante per istante. Tutti i dati sono inviati anche al display in cabina per consentire all'operatore di bordo, nel caso di guida manuale o semi-driverless, di correggere eventualmente la velocità di marcia o di supervisionare i comandi automatizzati.

Si è già descritto che il dato trasmesso attraverso la corrente codificata contiene due informazioni:

- la velocità consentita nella sezione di blocco attraversata;
- la velocità con cui entrare nella sezione successiva.

La seguente figura descrive il funzionamento:



### Figura 92: Dati trasmessi attraverso le correnti codificate

Nell'esempio in figura è mostrato il funzionamento dell'ATP continuo con quattro codici di velocità. Il Treno 2, in approccio al segnale A4 posto a verde, rileva il codice 40/40 che significa che può attuare una velocità massima di 40 km/h. sia nella sezione che sta attraversando che in quella successiva. Oltrepassato il segnale A4, il veicolo rileva il codice 40/25 che è un codice restrittivo di velocità in quanto sta ad indicare che la velocità consentita nella sezione A4 è 40 km/h, ma in quella successiva è 25 km/h. Quindi, il treno 2 utilizzerà la sezione A3 per rallentare da 40 a 25 km/h. Se quando il treno 2 entra nella sezione A3 il Treno 1 è ancora nella sezione A1 il codice captato sarà 25/0 cioè il treno dovrà rallentare fino ad arrestarsi completamente all'interno della stessa sezione. Nel caso in cui il conducente erroneamente attraversi il segnale rosso A2, il sistema di bordo applica la frenata d'emergenza ed il Treno 1 dispone di una distanza sgombera da altri convogli per arrestarsi in sicurezza.

Nel caso di guida manuale il macchinista visualizza il codice 40/25 sul cruscotto di guida e, pertanto, con un sistema ATP continuo è possibile teoricamente abolire i segnali luminosi di linea. Il punto in cui iniziare a rallentare è stabilito dall'operatore di bordo che ha esperienza e conoscenza della linea sufficiente per gestire la manovra di arresto.

In caso di guasto della trasmissione continua subentra un regime di circolazione degradata e la marcia è a vista.

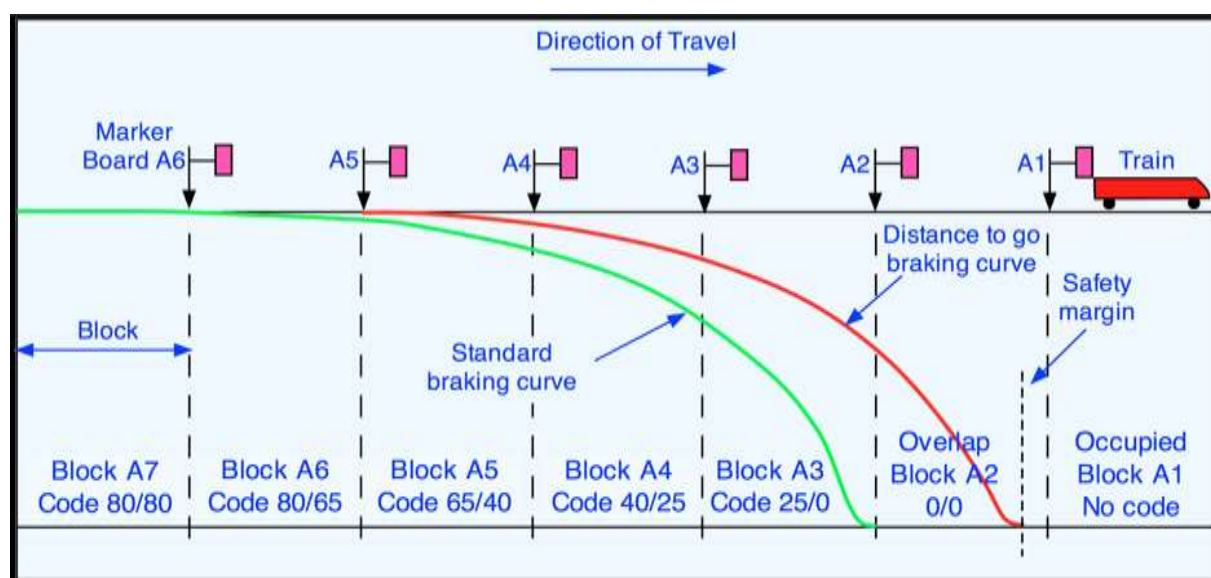
Nel caso, invece, di guida driverless (cioè di un sistema Automatic Train Operation – ATO, di cui si tratterà in seguito, associato all'ATP) l'operatore di bordo ha funzione di supervisore e si sostituisce al sistema ATO solo in caso di guasto del sistema o di condizioni di circolazione degradate. In tal caso, il punto di inizio frenatura può essere segnalato al convoglio o attraverso una boa posizionata nel punto stesso o, più semplicemente, dalla stessa variazione del codice trasmesso attraverso le rotaie.

La serie ordinata di codici si aggiorna progressivamente in funzione della liberazione o occupazione di una sezione: questo meccanismo consente di avere una risposta istantanea al variare delle condizioni delle sezioni di blocco e di rendere più fluida la circolazione dei convogli evitando inutili rallentamenti o, peggio, arresti e ripartenze.

Si è già anticipato che, oltre alle informazioni relative all'aspetto dei segnali ed alle velocità consentite, sono trasferiti da terra a bordo anche una serie di dati relativi alla distanza tra il veicolo ed il punto di arresto, definita *distance-to-go* nei sistemi metropolitani o distanza di *Movement Authority* nei sistemi AV.

Nei sistemi ATP in cui è disponibile anche questa informazione, ciascun convoglio è in grado di calcolare una curva di frenatura in funzione delle caratteristiche del tracciato (pendenza, aderenza)

e delle proprie prestazioni frenanti (massima decelerazione di servizio e di emergenza). Nota, quindi, la distanza di arresto effettiva e la velocità di marcia attuale il convoglio è in grado di stabilire il punto in cui iniziare a frenare indipendentemente dalle sezioni di blocco presenti sulla linea. Come mostrato nella seguente figura, in caso di ATP con trasmissione continua il layout delle sezioni di blocco rispecchia un profilo di decelerazione standard, cioè uguale per qualsiasi veicolo, mentre se i veicoli dispongono anche della distance to go sono in grado di regolare la marcia in base alla propria curva di frenatura.



**Figura 93: ATP continuo tradizionale ed ATP continuo con trasmissione della distanza a procedere (distance to go)**

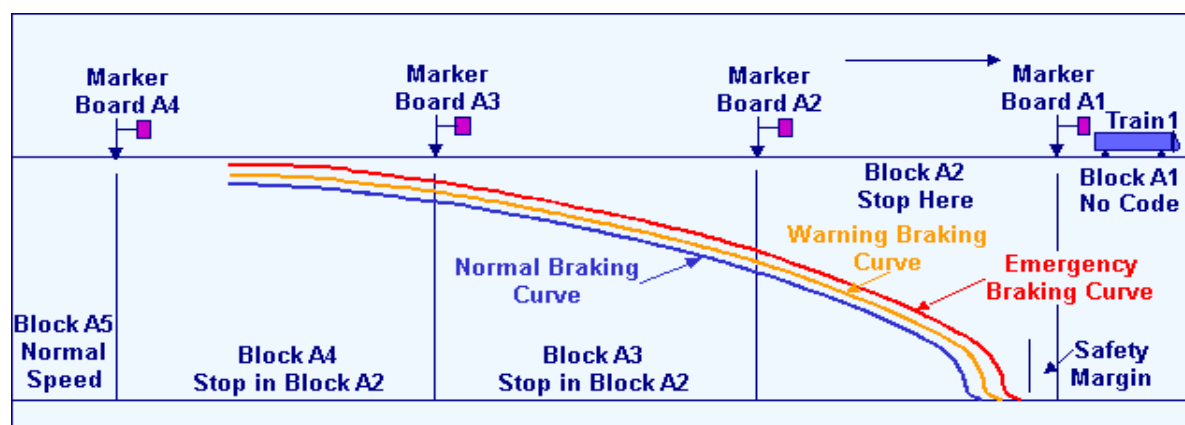
Dal momento che ogni veicolo elabora la propria curva di frenatura il controllo della velocità è attuato in modo continuo nel tempo e nello spazio ed è possibile ridurre notevolmente il distanziamento spaziale tra i veicoli ed incrementare la capacità della linea.

Infatti, il computer di bordo riceve dal sottosistema di terra la posizione del segnale rosso a valle ed in base ad esso elabora la curva di frenatura ed il punto di inizio frenatura. Per elaborare le curve di frenatura il computer di bordo necessita di inerenti lo stato della linea (dinamici), di dati statici inerenti il tracciato (pendenza, raggio di curvatura, velocità massima civile, tratto in galleria, tratto a singolo binario o a doppio, ecc.) e le caratteristiche fisico – prestazionali del convoglio. La curva di arresto così elaborata è mostrata nella figura precedente in rosso. Per norma è da prevedere sempre un margine di sicurezza per tener in conto eventuali errori di rilevazione delle velocità. Naturalmente anche in questo caso la decelerazione massima utilizzata per l'elaborazione della curva di arresto garantisce il comfort di viaggio ai passeggeri.

L'ATP con sistema speed steps e l'ATP con sistema distance-to-go presentano un'ulteriore differenza: sebbene entrambi i meccanismi prevedano il monitoraggio della velocità, il sistema speed steps fornisce un monitoraggio discontinuo, mentre il sistema distance-to-go un monitoraggio continuo.

Non appena il convoglio inizia a rallentare, il computer confronta il profilo di decelerazione del veicolo con la curva di frenatura e verifica che quest'ultima non venga mai oltrepassata. Per garantire che i dati di input per il calcolo della curva di arresto siano sempre corretti, in particolare la posizione del convoglio, vengono disposte delle boe tra le rotaie che consentono al convoglio di aggiornare periodicamente la mappa del computer di bordo durante il viaggio con le progressive rilevate.

Nel caso di guida manuale il computer di bordo elabora, in particolare, tre differenti profili di arresto come mostrato nella seguente figura:



**Figura 94: Curve di frenatura per guida manuale**

La Normal Braking Curve (blue) è il profilo di velocità che il macchinista deve seguire in condizioni ordinarie di circolazione, la Warning Braking Curve (arancione) è la curva inviluppo dei valori di velocità che se attuati fanno scattare un sistema di allerta del conducente (un allarme audio-visivo o un rallentamento automatico d'emergenza a seconda del sistema) e la Emergency Curve (rossa) è la curva inviluppo dei valori di velocità che se attuati fanno scattare automaticamente il sistema di arresto d'emergenza.

### **3.6.1.2 ATP con trasmissione discontinua**

Il sistema di ripetizione discontinua consente, nella sua configurazione base, la trasmissione puntuale di informazioni da una apparecchiatura di terra (boa), posta in mezzo al binario, ad una apparecchiatura di bordo.

L'apparecchiatura di bordo, oltre alle funzioni base (decodifica dell'informazione ricevuta, ripetizione dei segnali in macchina, eventuale intervento automatico per la frenatura di emergenza), può essere dotata di funzioni accessorie quali: misura della velocità, calcolo dello spazio percorso, elaborazione di curve velocità - spazio, funzioni di interfaccia verso unità centrali, ecc.

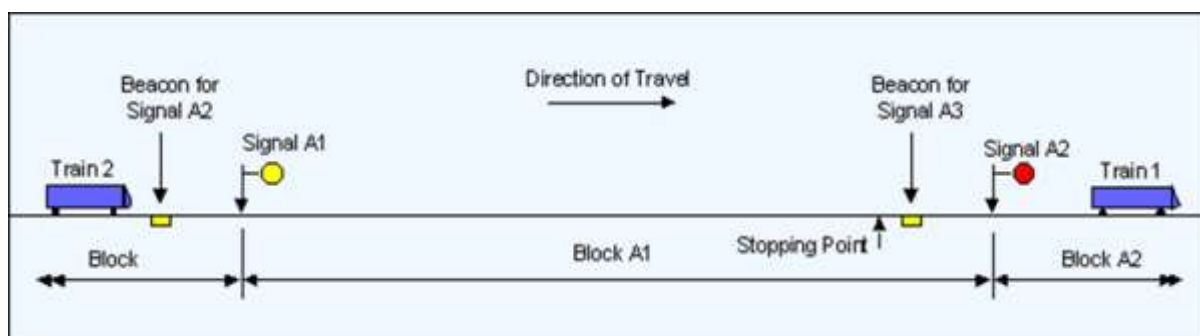
L'apparecchiatura di terra è costituita dalla boa mentre la parte di bordo dal captatore e dall'unità logica di controllo ed elaborazione.

Il sistema TRANSPONDER è sostanzialmente costituito da un radiotrasmettitore che permette l'invio di un messaggio dalla boa di terra verso il captatore di bordo e da quest'ultimo all'unità logica.

La boa di terra non richiede una sorgente locale di alimentazione; infatti, l'energia è fornita dal veicolo al suo passaggio sulla boa. Il riconoscimento del messaggio viene effettuato a bordo per mezzo di un microprocessore in sicurezza che si avvale di opportune schede di interfaccia. Il riconoscimento della presenza della boa avviene tramite un magnete permanente, alloggiato nella boa stessa, che si accoppia con un circuito magnetico testato, presente nel captatore di bordo. Il riconoscimento della presenza della boa, senza ricevimento del messaggio a bordo, causa il comando della frenatura di emergenza e l'arresto del treno.

Le funzioni principali di un sistema ATP discontinuo possono essere sinteticamente descritte come di seguito:

- gestione dell'apertura porte in sicurezza: il computer di bordo dà il consenso all'apertura delle porte solo dopo aver acquisito il messaggio della boa "di lato apertura" che conferma il corretto posizionamento del veicolo rispetto alla banchina;
- gestione marcia interstazionale: in ambito stazione sia l'aspetto dei segnali che il controllo delle velocità nelle zone di scambio vengono trasmessi e monitorati a mezzo di boe cioè solo con l'apparecchiatura di ATP discontinuo.



**Figura 95: Trasmissione segnale discontinua (ATP discontinuo)**

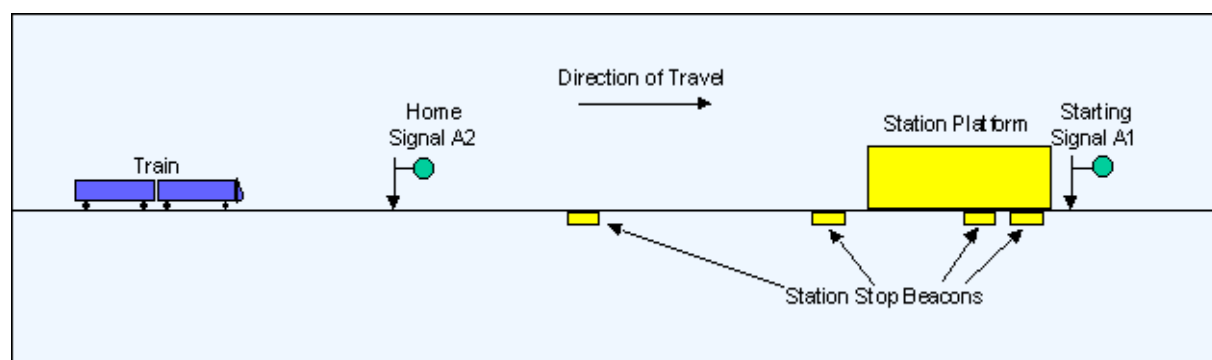
### 3.6.2 Automatic Train Operation (A.T.O.)

L'Automatic Train Operation è il sistema che realizza in modo automatico o semi automatico le operazioni in ambito stazione cioè arresto, attesa e ripartenza. Tale sistema consente di realizzare una guida completamente driverless. In particolare, le operazioni automatiche richieste per svolgere il normale esercizio passeggeri sono:

- avviare il treno da una stazione rispettando le prescrizioni imposte dal segnalamento;
- arrestare il treno in stazione in una posizione prefissata ed aprire le porte dal lato della banchina;
- al termine della corsa provvedere a portare il treno sul binario tronco per l'inversione del senso di marcia e riportare il treno in stazione, arrestandolo in un punto previsto.

In particolare, l'ATO non è un sistema a prova di guasto (fail-safe). Infatti, la funzione principale di un ATO è quella di garantire che un convoglio si fermi in un punto preciso all'interno della lunghezza delle banchine. Questo avviene dopo che il sistema ATP ha concesso l'ingresso del convoglio in stazione cioè verificato tutte le relative condizioni di sicurezza.

La seguente figura mostra uno schema di funzionamento del sistema ATO:



**Figura 96: Funzionamento del sistema ATO**

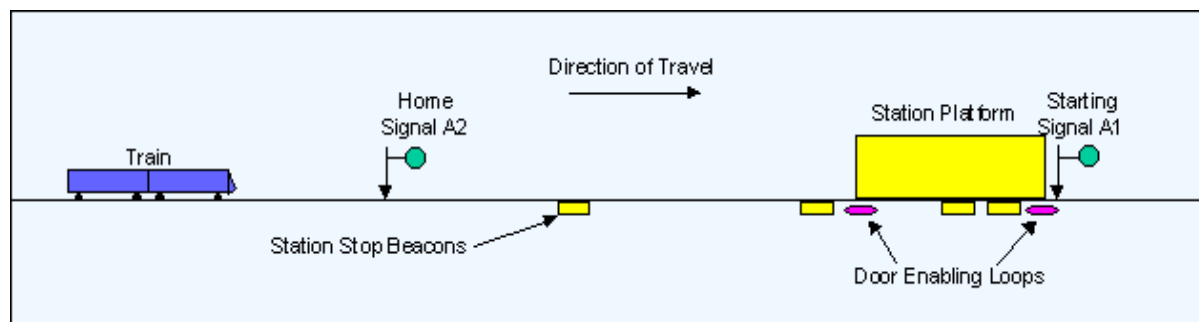
Il convoglio riceve il consenso di entrare in stazione dal segnale di ingresso stazione posto a verde (A2); nel momento in cui intercetta la prima boa di arresto riceve il comando di fermarsi per il servizio viaggiatori in stazione. Il computer di bordo, che ha ricevuto questo comando, elabora la curva di arresto per consentire al treno di fermarsi nel punto giusto; man mano che il treno avanza lungo la piattaforma, la curva è aggiornata un certo numero di volte, che varia da sistema a sistema, per garantire un elevato livello di precisione.

Se i treni sono guidati manualmente spetta al macchinista il compito di provvedere all'apertura e chiusura delle porte in stazione e di avviare la procedura per la ripartenza del treno dopo aver verificato la corretta chiusura delle stesse.



Alcuni sistemi sono progettati in modo da impedire che le porte siano aperte fino a quando il treno non è “approdato” nel posto giusto e sia completamente fermo.

Altri sistemi ATO, invece, prevedono anche il comando automatico dell’apertura e chiusura delle porte secondo il meccanismo descritto con riferimento alla seguente figura:



**Figura 97: Il sistema ATO in ambito stazione**

Il sistema ATO consente di realizzare la guida automatica cioè senza conducente. Le varie funzionalità del sistema variano a seconda della fase di guida; infatti, è possibile distinguere:

- una fase di sosta in stazione;
- una fase di marcia automatica in linea;
- fase di arresto al bersaglio.

Fase di sosta in stazione

Durante la fase di sosta in stazione il sistema ATO aziona e stacca il freno di stazionamento. A treno fermo, il sistema ATO verifica che l’errore del punto di arresto non superi un certo valore soglia, quindi comanda l’apertura porte e ne verifica l’esecuzione.

Fase di marcia automatica in linea

Per immettere il veicolo in piena linea il sistema ATO si interfaccia con l’ATP da cui riceve il via libera. Nel corso della fase di marcia automatica in linea il sistema ATO gestisce la fase di avviamento, di regime, di inerzia e di decelerazione. Infatti, l’ATO si interfaccia con l’apparato motore e con quello frenante. Durante la marcia, l’ATO utilizza la velocità massima consentita fornita dall’ATP per comandare l’accelerazione o la decelerazione. Al raggiungimento di una zona di raccordo fra le diverse velocità di codice (zona di linea in cui si effettua la decelerazione del treno) l’ATO segue una curva di decelerazione che è sempre al di sotto della curva di intervento dell’A.T.P.

### 3.6.3 Automatic Train Supervision (A.T.S.)

L'Automatic Train Supervision può essere definito come un sistema di supervisione e non di vero e proprio comando e controllo del veicolo; esso, infatti, ingloba tutte le funzionalità necessarie alla gestione del traffico (ritardi, anticipi, coincidenze, sedi di incrocio) ed è, quindi, un sistema che si interfaccia con quelli propri del segnalamento (ATP, ATO). Anche il sistema ATS non è fail-safe ed è sempre subordinato al sistema ATP. Alcune delle funzioni del sistema di supervisione sono: la gestione dell'orario di servizio (Timetable) e la riprogrammazione in caso di degradi, la regolazione automatica della circolazione; la gestione degli Allarmi, la registrazione degli eventi. E', quindi, un sistema che supporta gli operatori del centro di comando operativo nella programmazione e gestione del traffico sulle reti.

### 3.6.4 Automatic Train Control (A.T.C)

L' Automatic Train Control è il sistema che include tutte le funzioni per la gestione della circolazione che sono automatizzate; con ATC si indica il sistema globale che include l'ATP, l'ATO e l'ATS.

Nella seguente figura è mostrato uno schema di funzionamento di un ATC su linea con blocco fisso:

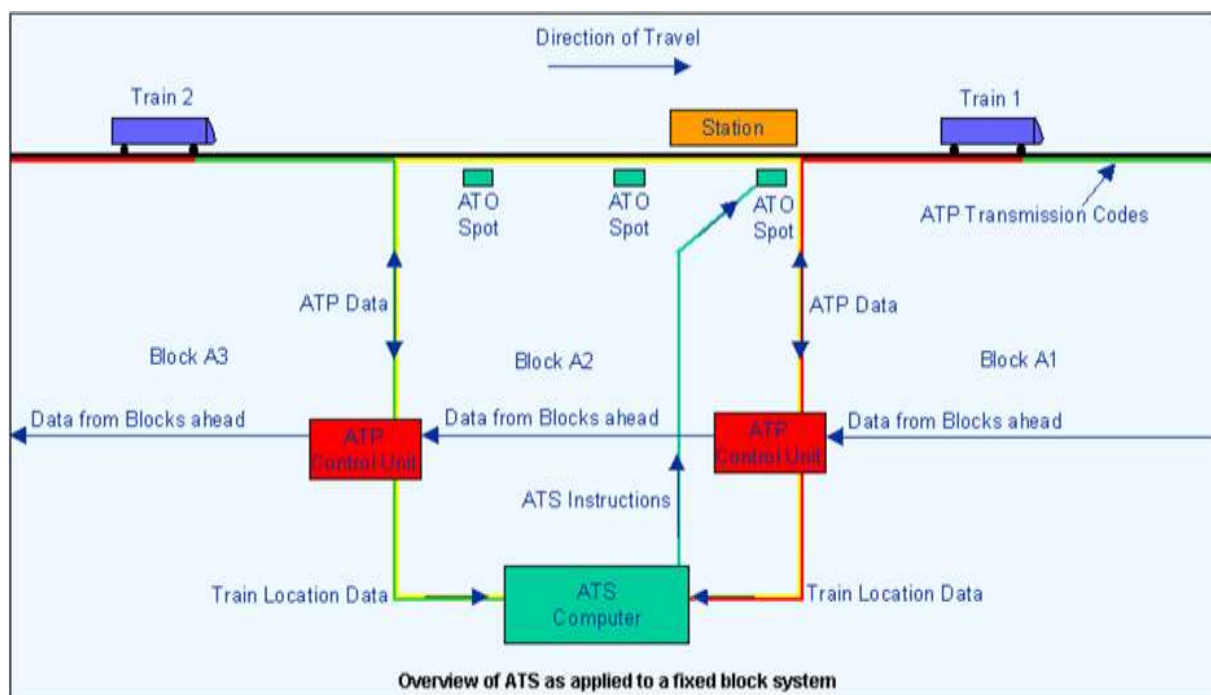


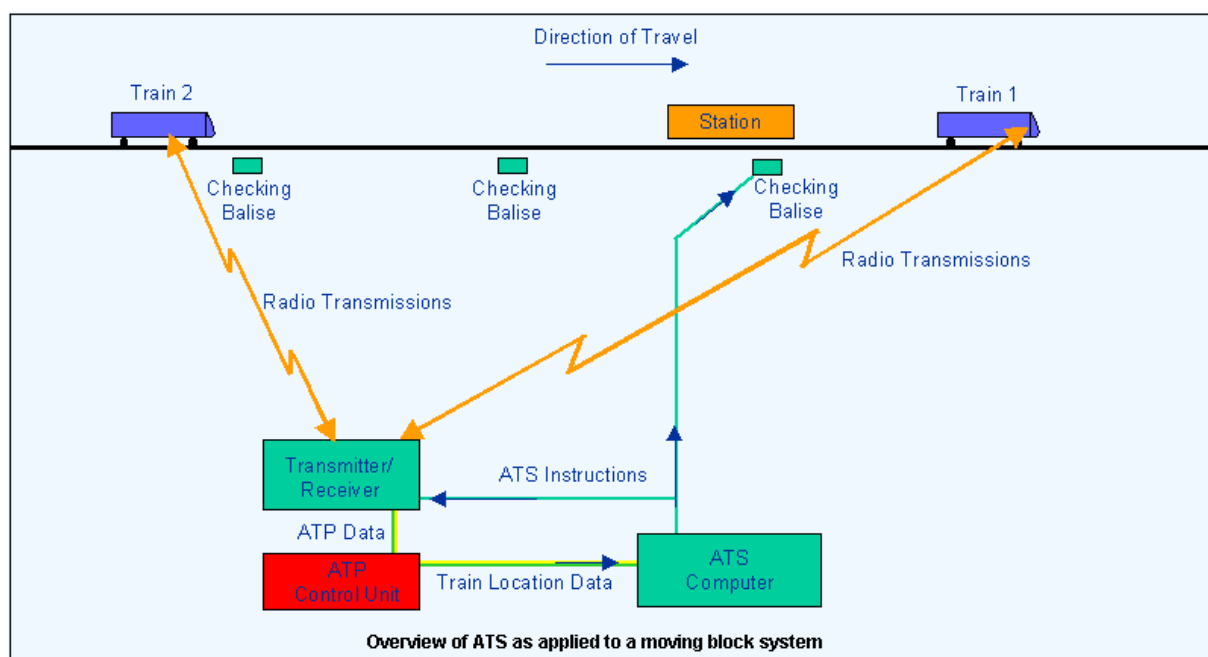
Figura 98: Automatic Train Supervision con blocco fisso

Come è possibile notare in figura, l'ATS necessita di dati forniti dall'ATP (posizione veicoli e stato degli enti di piazzale) per programmare l'orario di esercizio. Le informazioni aggiornate così programmate vengono inoltrate ai dispositivi di ATO che, quindi, le trasmettono ai veicoli.

Il distanziamento in sicurezza dei veicoli è garantito dall'ATP che riceve in ingresso lo stato di occupazione/liberazione delle sezioni di blocco ed include le logiche del segnalamento (*ATP Control Unit*). A sua volta, l'unità di controllo ATP inoltra le posizioni dei veicoli al computer predisposto alla funzione di Automatic Train Supervision, in genere installato in ogni stazione, che confronta questi dati con l'orario di servizio per determinare se il treno sta rispettando l'orario, è in ritardo o è in anticipo. Per modificare l'orario programmato l'ATS può inviare comandi ai punti ATO ubicati lungo il percorso.

I punti ATO forniscono al convoglio i comandi per la fermata in stazione ed il servizio passeggeri.

Nella seguente figura, invece, è mostrato uno schema di funzionamento di un ATS su linea con blocco mobile:



**Figura 99: Automatic Train Supervision con blocco mobile**

Se la localizzazione ed integrità dei veicoli sono verificate dal sottosistema di bordo è possibile ridurre notevolmente le componenti tecnologiche di terra.

### 3.7 Il Modello del tempo di blocco (Blocking Time Model)

I modelli di inseguimento treni sono indispensabili sia per la progettazione di un orario di servizio che per la progettazione di un sistema di segnalamento. Essi, infatti, hanno lo scopo di descrivere analiticamente l'interazione tra due veicoli successivi ed, in particolare, la risposta del veicolo "follower" agli stimoli del veicolo "leader". Nel caso di progettazione di un orario di servizio il modello viene applicato al fine di programmare gli orari di partenza/arrivo stazione in modo che ciascun convoglio possa marciare sempre alla massima velocità di esercizio senza effettuare rallentamenti o arresti a causa del veicolo leader. Nel caso, invece, di progettazione di un sistema di segnalamento il modello di inseguimento treni è applicato per verificare che, in caso di arresto del veicolo leader, il veicolo follower abbia a disposizione un spazio sufficiente ad arrestarsi senza collidere.

In generale, il tragitto di un veicolo è inteso come il profilo tempo-spazio che descrive l'occupazione dell'infrastruttura da parte di un veicolo rispetto al tempo ed allo spazio (Pachl, 2002). A causa delle logiche di sicurezza per il distanziamento ad intervalli di spazio applicate in ambito ferroviario, cioè delle logiche alla base del segnalamento, l'occupazione dell'infrastruttura da parte di un veicolo ferroviario non può essere semplicemente descritta dalla sua traiettoria, ma è necessario considerare l'intera fascia temporale ("time channel") che il suo moto genera.

Per affrontare questa problematica è applicato sin dagli anni '50 il cosiddetto "Modello del tempo di blocco (*Blocking Time Model*)" (Happel, 1959).

La validità di tale modello è, ormai, ampiamente riconosciuta sia nel contesto europeo che americano e la sua ricorrente applicazione sia a scopi di ricerca scientifica che per l'esercizio ferroviario ne sono la dimostrazione.

Per applicare il modello del tempo di blocco è necessario, innanzitutto, conoscere le logiche del segnalamento implementato sulla linea in esame.

Come ampiamente descritto nel paragrafo 3.6.1 i diversi sistemi di Automatic Train Protection si distinguono a seconda di come è trasmessa la Movement Authority da terra a bordo ed in che modo venga gestita la liberazione della tratta a monte del convoglio (concetto di *overlap*).

Se la movement authority, cioè il punto in cui attuare una specifica velocità obiettivo (maggiore o uguale a zero), coincide con il punto iniziale di una sezione di blocco occupata allora il distanziamento è realizzato con blocco fisso (Hansen and Pachl, 2008).

E' stato, inoltre, dimostrato che anche nei sistemi ATP con trasmissione continua è necessario adottare le sezioni di blocco in quanto non si dispone di tecnologie sufficientemente affidabili per svolgere le funzioni di localizzazione e verifica integrità del convoglio (cd. *train positioning* e *train integrity*).

In sostanza, il vincolo che rende ancora non operativo il distanziamento con blocco mobile è di natura tecnologica.

Infatti, il livello operativo 3 dello standard ETCS è concepito per un distanziamento a blocco mobile, ma non è ancora implementabile su linea a causa del problema irrisolto della verifica di integrità del veicolo.

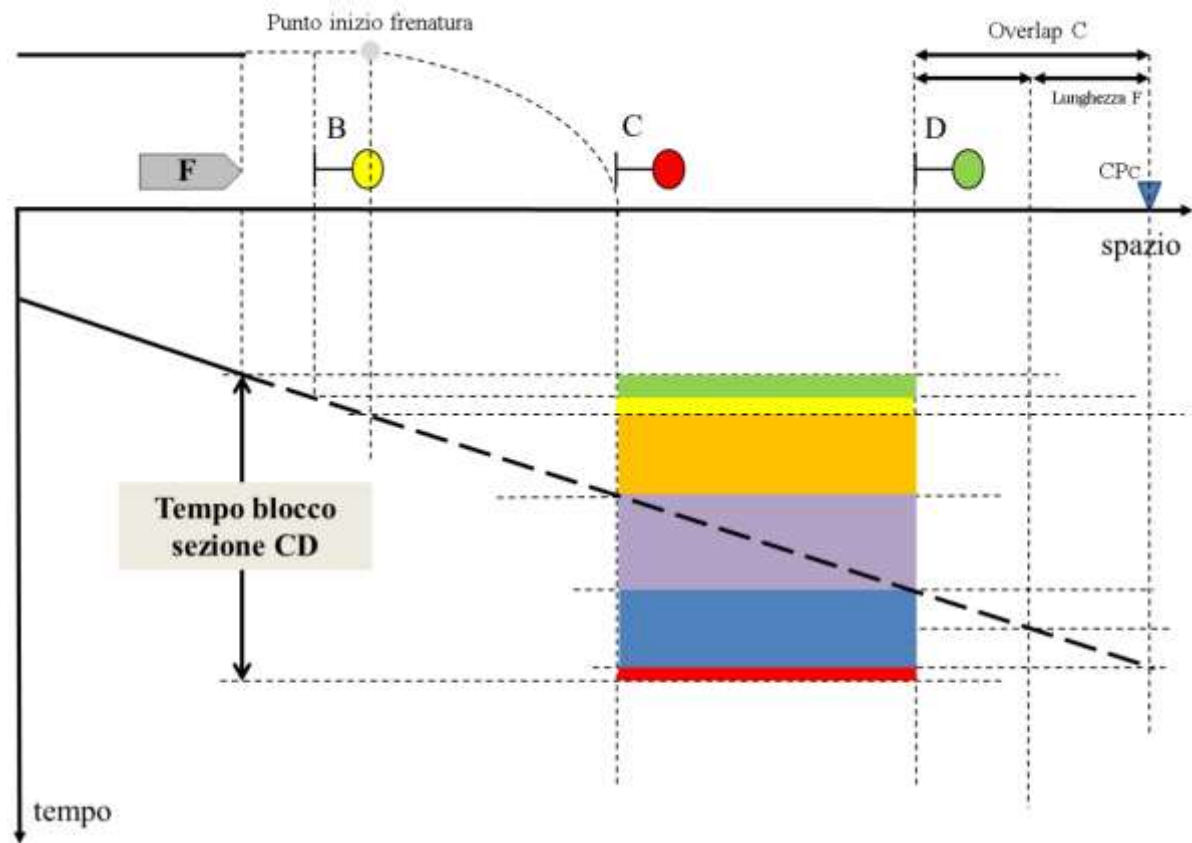
Il cosiddetto “tempo di blocco” è definito come il periodo durante il quale una porzione di linea (ad esempio una sezione di blocco o un’area di scambio) è disponibile esclusivamente per un convoglio e, quindi, non può essere né prenotata né occupata da un altro (Hansen and Pachl, 2008).

Pertanto, l’istante iniziale del tempo di blocco coincide con l’istante in cui inizia il ciclo delle azioni di sicurezza (formazione itinerario, manovra a via libera del segnale di ingresso sezione, manovra deviatore, occupazione del segnale e liberazione dell’itinerario).

In particolare, il tempo di blocco di una tratta è costituito da un periodo antecedente l’ingresso del convoglio nella sezione, dal periodo di attraversamento della sezione stessa e da un periodo successivo all’uscita del veicolo dalla sezione.

Considerando, ad esempio, una sezione di blocco il tempo di blocco è costituito dalle seguenti aliquote:

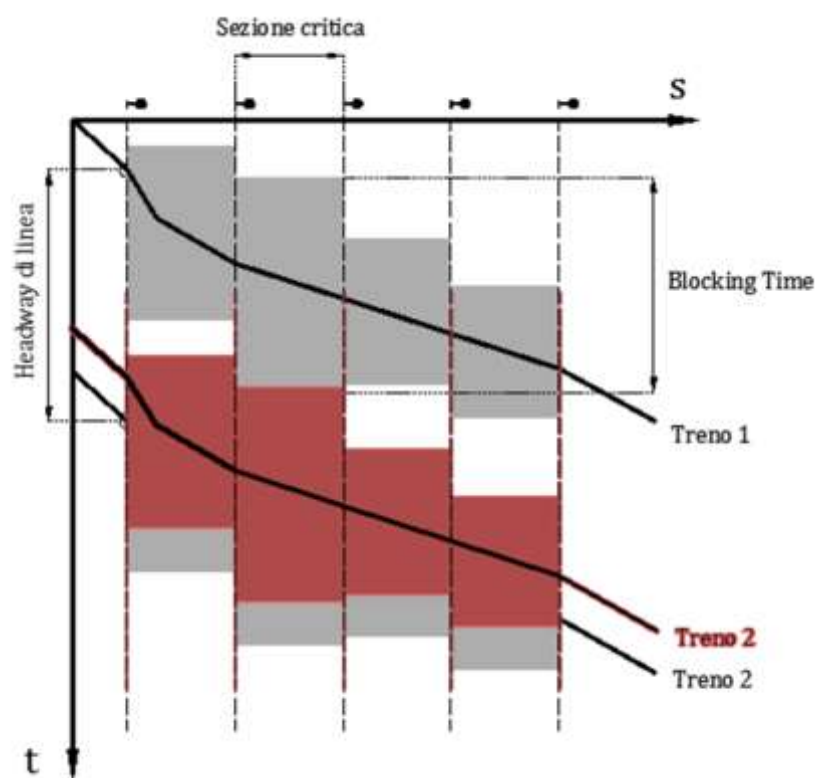
- tempo iniziale di interlocking (*time for clearing the signal*), è il periodo necessario a formare l’itinerario (verificando l’assenza di altri veicoli), manovrare gli eventuali deviatori e verificarne la fermascambiatrice; indicato in verde in figura;
- tempo di percezione e reazione (*signal watching time*), è il periodo che trascorre tra l’acquisizione dell’informazione aggiornata da terra e l’istante in cui viene attuato il comando di guida; durante questo periodo si assume che la velocità di marcia rimanga costante; indicato in giallo in figura;
- tempo di approccio segnale (*approach time*), tempo impiegato per l’eventuale completo arresto del veicolo; tempo di attraversamento (*time between block signals*), tempo impiegato dal convoglio per attraversare con la testa la sezione di blocco; indicato in arancione in figura;
- tempo di liberazione sezione (*clearing time*), tempo impiegato dal veicolo per liberare sia con la testa che con la coda l’overlap del segnale di ingresso sezione; indicato in blue in figura;
- tempo finale di interlocking (*release time*), tempo necessario al sistema di interlocking per verificare l’integrità del treno e mettere a verde il segnale di ingresso sezione; indicato in rosso in figura.



**Figura 100: Aliquote del tempo di blocco**

Il valore delle diverse aliquote del tempo di blocco dipende dal tipo di segnalamento (tipo di blocco, tipo di trasmissione) e dalla tecnologia impiegata per la trasmissione delle informazioni terra-terra e terra-bordo (Verkehrswissenschaftliches Institute – Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 2008).

Se si rappresentano su un unico diagramma i tempi di blocco di tutte le sezioni di blocco attraversate da un convoglio nel suo percorso si ottiene un diagramma a barre definito *blocking time stairway* che rappresenta la l'occupazione operativa della tratta da parte di un veicolo (figura 101).



**Figura 101: Diagramma dei tempi di blocco e distanziamento temporale teorico per una linea con blocco fisso**

La sovrapposizione dei diagrammi del tempo di blocco di una sezione di blocco attraversata da due veicoli successivi consente di ricavare cosiddetto *signal headway* ovvero il distanziamento temporale minimo tra due veicoli successivi che non genera punti di conflitto.

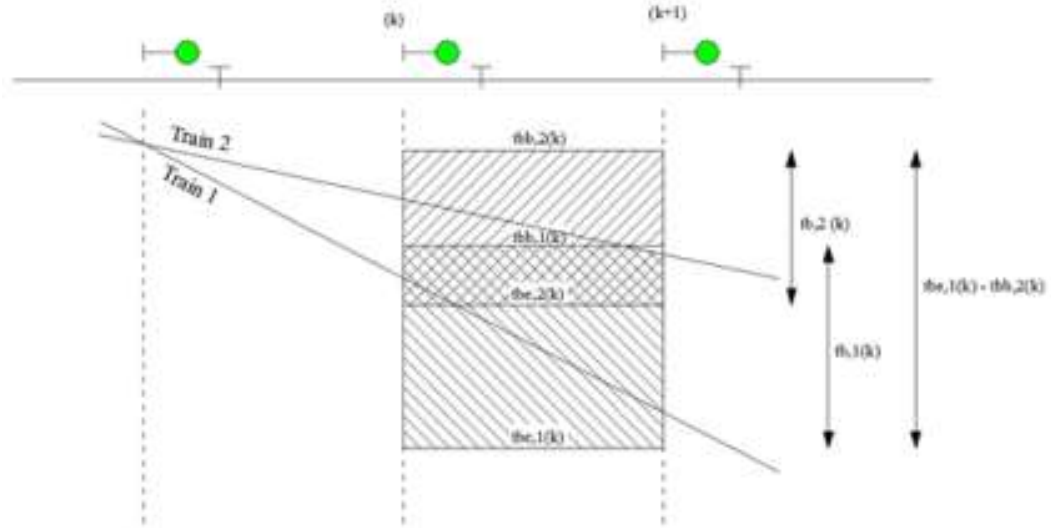
Se, invece, si costruiscono i diagrammi per un'intera porzione di linea compresa tra due stazioni si può definire il cosiddetto *headway di linea*. Esso è il massimo valore tra tutti i *signal headway* definiti nella tratta.

La sezione di blocco in cui il gap tra i due tempi di blocco (riferiti ai due veicoli) è minore è definita "sezione di blocco critica" ed è la sezione che determina l'*headway di linea* teorico.

Come già anticipato, il modello del tempo di blocco può essere applicato per calcolare il minimo distanziamento di linea cioè il cosiddetto minimo *headway* teorico di linea (Hansen e Pachl, 2008).

Infatti, ipotizzando che due convogli successivi partano contemporaneamente da una stazione, si sovrappongono i tempi di blocco relativi a ciascuna sezione: l'area di sovrapposizione costituisce il periodo di tempo che è necessario sfalsare la partenza del secondo convoglio per eliminare la conflittualità di occupazione per quella sezione di blocco. Tale sfalsamento temporale costituisce il *signal headway* per quella sezione cioè dopo quanto tempo può partire il secondo convoglio per

trovare a via libera il segnale di ingresso della sezione di blocco e, quindi, non dover effettuare rallentamenti o arresti non programmati.



**Figura 102: Tempi di blocco e punti di conflitto**

Ricavati i tempi di overlap per ciascuna sezione di blocco, il *minimo headway di linea* è il massimo valore tra tutti i tempi di overlap:

$$t_{h,ij} = \max\{t_{be,1(k)} - t_{bb,2(k)}\} \quad \text{per } k = 1, \dots, n_b$$

dove

$t_{be,ik}$  è l'istante finale del tempo di blocco del treno i-esimo nella sezione di blocco k-esima;

$t_{bb,ik}$  è l'istante iniziale del tempo di blocco del treno j-esimo nella sezione di blocco k-esima;

$n_b$  è il numero totale di sezioni di blocco considerate.

Se il sistema di ATP è dotato della funzione di cab signalling il vantaggio in termini di capacità di linea consiste nella possibilità di anticipare la trasmissione dell'aspetto del segnale rosso un numero  $n$  di sezioni di blocco prima di raggiungerlo. Infatti, considerando una tratta pianeggiante, il distanziamento minimo tra due veicoli che viaggiano alla stessa velocità  $v$  è espresso come (Daniel, 2008):

$$h_{min} = t_w + \frac{\left(1 + \frac{1}{n}\right)v}{2 \cdot d} + \frac{L_0 + L_t}{v} + t_i \quad (1)$$



dove  $t_w$  è il signal watching time,  $n$  il numero di sezioni di blocco necessarie per arrestare il veicolo dalla velocità massima consentita sulla tratta,  $d$  è la decelerazione supposta costante,  $v$  la velocità iniziale,  $L_0$  è l'overlap del segnale di ingresso della sezione,  $L_t$  la lunghezza del treno e  $t_i$  la somma del tempo iniziale e finale di interlocking.

Tuttavia, il minimo headway così ottenuto rappresenta un valore teorico e non operativo in quanto non garantisce alcuna robustezza agli orari di partenza programmati. Infatti, anche il minimo ritardo maturato da un veicolo si propaga ai veicoli a monte facendo crescere progressivamente il ritardo in stazione all'aumentare dei veicoli transitati. Il ritardo che matura un veicolo per effetto di uno o più veicoli precedenti è definito *knock-on delay*.

Quindi, per assorbire i ritardi di modesta entità si maggiora il minimo headway di un'aliquota definita *buffer time*. In genere, tale valore è stabilito come la più piccola delle finestre temporali di non occupazione definite tracciando i tempi di blocco di due veicoli successivi.

### 3.7.1 Tempo di blocco per ETCS Livello 1

Nel livello operativo 1 il distanziamento dei veicoli ferroviari è regolato dal blocco fisso e la conoscenza della posizione degli stessi ha una precisione limitata allo stato di occupazione delle sezioni di blocco. L'aspetto dei segnali luminosi è regolato dagli apparati centrali in ambito stazione (interlocking) che acquisiscono lo stato delle sezioni di blocco attraverso i dispositivi di terra disposti lungo i binari (es: circuiti di binario, boe, pedali conta asse, ecc.).

Ciascun veicolo elabora a bordo la curva di frenatura in base alle proprie prestazioni frenanti, alle caratteristiche del tracciato ed al successivo punto obiettivo costituito da una velocità obiettivo e da una progressiva in cui attuare tale velocità; tale punto è definito *Movement Authority* (SUBSET-026-3, 2014).

Tra le rotaie sono disposte sia boe fisse che commutative: le boe fisse sono utilizzate per la correzione degli errori odometrici, le boe commutative sono utilizzate per trasmettere la MA direttamente in cabina (cd. funzione di cab signalling).

Con il cab signalling il numero di sezioni di blocco  $n$  può essere aumentato riducendo l'approach time cioè il tempo di anticipo a cui trasmettere l'informazione di segnale rosso. Al tendere ad infinito del valore di  $n$  (cioè passando ad una trasmissione continua nel tempo e nello spazio), l'espressione (1) si riduce a:

$$h_{min} = t_w + \frac{v}{2 \cdot d} + \frac{L_0 + L_t}{v} + t_i$$

ovvero il distanziamento minimo tra due veicoli è pari alla somma del tempo di reazione, arresto, liberazione dell'overlap e di interlocking.

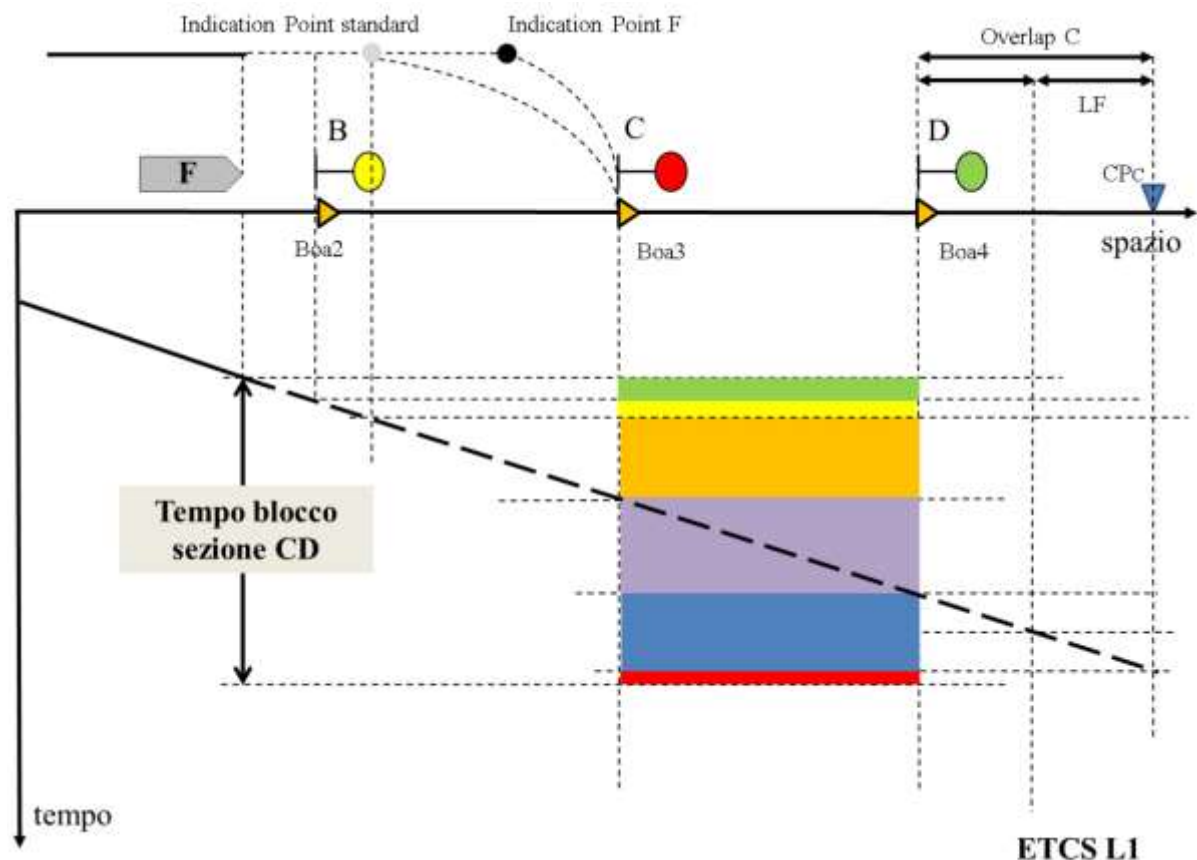
A partire dallo *Static Speed Profile* (SSP), cioè dal profilo delle velocità massime consentite sulla tratta che non dipendono dalle logiche del segnalamento ferroviario, il computer di bordo elabora il *Most Restrictive Speed Profile* (MRSP) cioè il profilo di velocità da attuare in funzione della MA corrente.

L'Operatore di Bordo visualizza la velocità massima consentita (*Permitted speed*) sul cruscotto di guida ed attua il comando necessario (accelera o decelera).

Nel livello operativo 1 la MA coincide con il primo segnale luminoso rosso a valle; esso può trovarsi ad una o più sezioni di blocco a valle del convoglio; ciascuna boa commutativa è concatenata con le altre e trasmette l'aspetto di un unico segnale luminoso. Solo quando il convoglio passa su una boa commutativa riceve una nuova MA: il messaggio di MA contiene la velocità obiettivo (cd. *target speed*) ed il punto in cui deve essere attuata tale velocità (cd. *End of Authority* se la velocità obiettivo è nulla, *Supervised Location* se la velocità obiettivo è diversa da zero). La sovrapposizione dello SSP e della curva di frenatura elaborata ad hoc consente di ricavare anche il punto di inizio frenatura (cd. *Indication Point*).

Il layout delle boe rispecchia quello delle sezioni di blocco in quanto bisogna considerare la distanza di arresto del convoglio con le prestazioni frenanti peggiori (*Indication point standard*). L'IP rappresenta il punto in cui effettivamente il veicolo inizia a frenare applicando la piena decelerazione (*full braking deceleration*) compatibile con l'aderenza disponibile, il comfort ed il massimo sforzo frenante fornito dai freni.

Il *Pre-Indication Point* è il punto in cui viene visualizzato all'operatore di bordo il primo messaggio di avviso di ingresso in una zona di decelerazione (*target speed monitoring*). Quindi, il pre-indication point è il punto in cui il convoglio transita sulla boa commutativa.



**Figura 103: Tempo di blocco per ETCS L1**

Un segnale luminoso è definito principale se può mostrare anche aspetto “rosso”; per motivi di sicurezza, un segnale principale è sempre anticipato da un segnale che mostra aspetto “giallo” cioè da un segnale di avvertimento che può essere un altro segnale principale oppure un segnale definito secondario cioè che può mostrare solo aspetto “verde” o “giallo” (Cantarella, 2007).

Nello schema mostrato nella figura precedente il segnale C (rosso) indica il punto che il convoglio non deve oltrepassare. Il tempo durante il quale un segnale principale rimane a via impedita (rosso) dipende dal tempo di blocco della sezione di blocco che il segnale protegge.

Con riferimento alla precedente figura, affinché il veicolo F possa trovare a via libera (verde) il segnale C:

- il veicolo Leader deve aver liberato la sezione di blocco sia con la testa che con la coda; il tempo necessario per realizzare questa condizione è il *running time* (colore viola);
- il veicolo Leader deve aver liberato l'overlap della sezione di blocco C-D sia con la testa che con la coda; il tempo necessario per realizzare questa condizione è il *clearing time* (colore blue);

- il segnale di protezione della sezione di blocco occupata dal veicolo Leader (cioè il segnale C) deve essere posto a via impedita non appena esso vi accede affinché il veicolo Leader sia protetto dai veicoli in transito a monte; il tempo necessario per realizzare questa condizione è il tempo finale di interlocking (*release time*) in quanto è un tempo che dipende dal sistema di interlocking (logica di sicurezza e tecnologia) presente sulla linea (colore rosso);
- il veicolo F in approccio alla sezione di blocco C-D deve essere protetto da eventuali veicoli provenienti da versi opposti cioè deve essere attuato il comando ed il controllo della formazione ed occupazione dell'itinerario programmato per il veicolo F; il tempo necessario per realizzare questa condizione è il tempo iniziale di interlocking (*clearing time*) ed è, anch'esso, un tempo che dipende dal sistema di interlocking presente sulla linea (colore verde).

E' fondamentale sottolineare che nel livello 1 ciascun convoglio avrà un istante iniziale del tempo di blocco diverso che dipende dalla posizione della boa che per lo specifico veicolo costituisce l'indication point (e che può essere diversa in funzione delle prestazioni frenanti del veicolo). Quindi, per alcune categorie di veicoli la boa di inizio tempo di blocco (*blocking time reference balise group*) si troverà molto prima dell'inizio della curva di frenatura, mentre per altri ad una distanza minima e funzione solo dei tempi di reazione del sistema di bordo (Verkehrswissenschaftliches Institut - Aachen, 2008).

Dall'istante in cui un convoglio transita su una boa commutativa e riceve, quindi, la Movement Authority aggiornata bisogna considerare un ritardo relativo al sottosistema di terra ed uno relativo al sottosistema di bordo; entrambi dipendono dalla tecnologia impiegata.

Tali ritardi saranno indicati nel seguito come *track side reaction time* (TS) ed *on board reaction time* (OB). Questi ritardi condizionano il tempo di preavviso necessario per garantire che il veicolo inizi a frenare con il giusto anticipo rispetto al punto di arresto.

L'on board reaction time (OB) assume lo stesso valore per tutti i livelli operativi ETCS ed inizia dalla visualizzazione sul cruscotto di guida del messaggio di Pre-Indication.

Le aliquote che compongono l'OB sono:

- tempo di permanenza del messaggio di avviso sul cruscotto di guida che informa l'operatore di bordo che sta per entrare in una zona di target speed monitoring (*T\_PreIndication*); esso vale 7 s (*Fixed Value*);
- tempo di reazione del macchinista (*T\_driver*) pari a 4 secondi (*Fixed Value*);
- tempo per sviluppare la decelerazione massima (*T\_bs*); esso è un tempo relativo all'apparato frenante ed è funzione della lunghezza e del tipo (passeggeri o merci) del

convoglio, del tipo di freno e della velocità obiettivo. Per un convoglio passeggeri lungo 100 m e con freno pneumatico  $T_{bs}$  è circa 4 secondi.

- tempo per visualizzare la velocità target (comunicata dal RBC) all'operatore di bordo; tale tempo è indicato come  $T_{Indication}$  ed è pari al massimo tra 5 secondi e  $0,8 \cdot T_{bs}$ .

Il valore del track side reaction time per l'ETCS Livello 1 assume valori prossimi ai 2 secondi (Verkehrswissenschaftliches Institute – Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 2008).

In particolare, nell'ETCS L1 le azioni che il sistema deve attuare sono:

- trasmissione dell'aspetto del segnale luminoso dal segnale alla Lineside Electronic Unit (LEU);
- elaborazione dell'informazione e trasmissione del pacchetto informativo alla boa commutativa da parte della LEU;
- captazione del pacchetto informativo da parte dell'antenna di bordo, elaborazione dell'informazione da parte del computer di bordo (European Vital Computer) e trasmissione del messaggio informativo al cruscotto di guida (Man Machine Interface o Driver Machine Interface).

Componenti	Tempo reazione medio [s]
LEU	0,7
EVC + MMI	1
Totale	1,7

**Tabella 1: Tempo di reazione del sistema per ETCS L1 ed ETCS L1 Infill**

Nel caso di ETCS L1, quindi, il *signal watching time* è pari a 1,7 secondi.

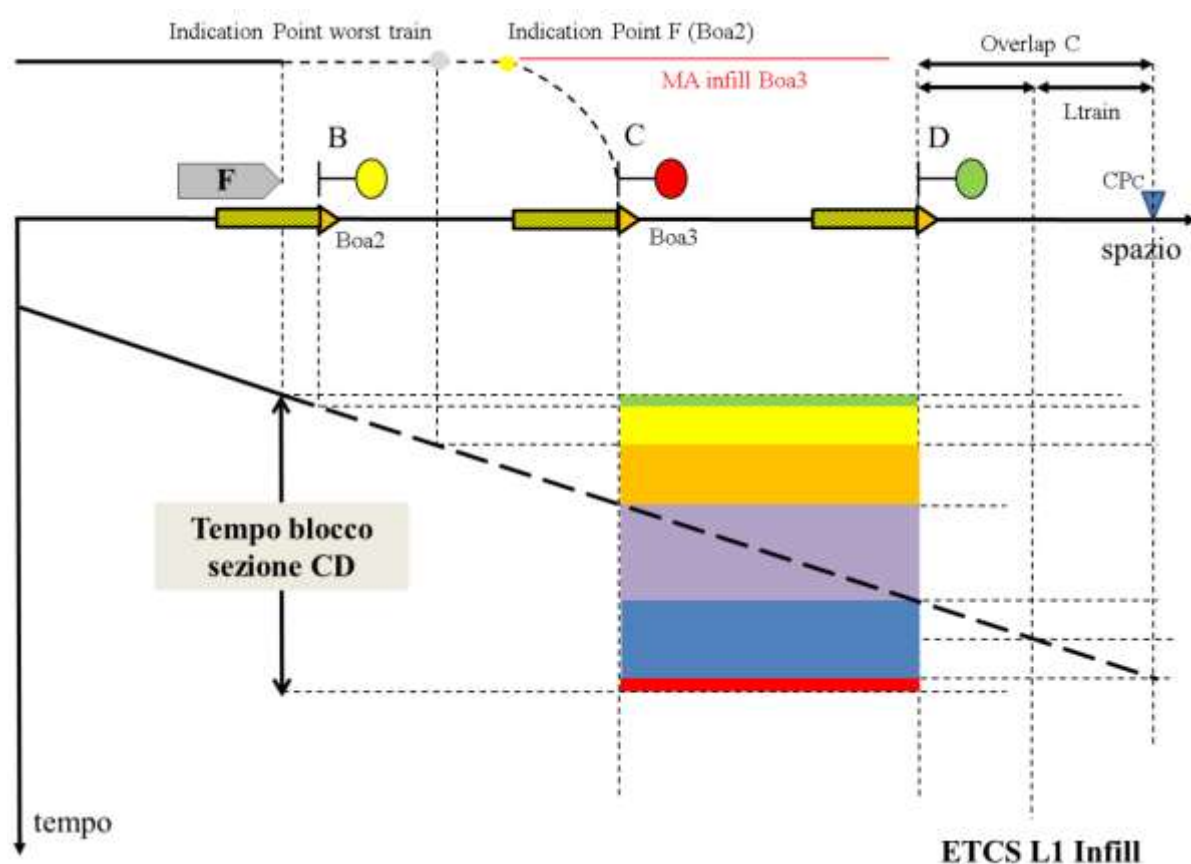
Tuttavia, la sezione di blocco viene già allocata un periodo di tempo antecedente il pre-indication point e pari al tempo iniziale di interlocking (*time for clearing the signal*). Tale aliquota del tempo di blocco dipende dalla tecnologia utilizzata per le funzioni di interlocking.

### **3.7.2 Tempo di blocco per ETCS Livello 1 con Infill**

Nel caso in cui il livello 1 sia in versione Infill la MA di una boa commutativa può essere trasmessa anche per un tratto antecedente alla boa stessa; tale informazione può essere anticipata tramite spire poste tra i binari (cd. Euroloops) oppure attraverso GSM-R.

La Movement Authority comunicata a mezzo di un dispositivo infill può ridurre, estendere oppure confermare la MA comunicata al veicolo con la precedente boa commutativa.

Le aliquote che compongono il tempo di blocco di una generica sezione di blocco sono le stesse di quelle definite per l'ETCS L1 senza funzione infill:



**Figura 104: Tempo di blocco per ETCS L1 con Infill**

### 3.7.3 Tempo di blocco per ETCS Livello 2

Nel livello operativo 2 il distanziamento dei veicoli ferroviari è regolato dal blocco fisso e la conoscenza della posizione degli stessi ha una precisione limitata allo stato di occupazione delle sezioni di blocco. L'aspetto dei segnali luminosi è regolato dagli apparati centrali in ambito stazione (interlocking) che acquisiscono lo stato delle sezioni di blocco attraverso i dispositivi di terra disposti lungo i binari (es: circuiti di binario, boe, pedali conta asse, ecc.).

In linea sono installate solo boe di tipo fisso in quanto la MA viene trasmessa dal Radio Block Center (RBC) a ciascun veicolo attraverso GSM-R, quindi anche per questo livello vi è la funzione di cab signalling. L'ulteriore vantaggio nel livello 2 consiste nel fatto che

A partire dallo Static Speed Profile (SSP), cioè dal profilo delle velocità massime consentite sulla tratta che non dipendono dalle logiche del segnalamento ferroviario, il computer di bordo elabora il Most Restrictive Speed Profile (MRSP) cioè il profilo di velocità da attuare in funzione della MA corrente.

L'Operatore di Bordo visualizza la velocità massima consentita (Permitted speed) sul cruscotto di guida ed attua il comando necessario (accelera o decelera).

Nel livello operativo 2 la verifica di integrità dei convogli è ancora svolta dai dispositivi di terra, mentre ciascuno di essi invia al RBC la propria posizione attraverso un cd. *Position report*.

Essendo ancora un ATP con distanziamento a blocco fisso, anche per il livello 2 bisogna considerare il modello del tempo di blocco, ma in questo caso la progressiva che segna l'inizio del blocco dipende direttamente dall'indication point del convoglio in transito (Verkehrswissenschaftliches Institut - Aachen, 2008).

L'evento che origina l'aggiornamento della MA è, in genere, definito dal Gestore Infrastruttura; tale evento può essere una o più delle seguenti condizioni (SUBSET-026-3, 2014):

- la richiesta da parte di un veicolo al RBC; in tal caso si parla di *train initiated MA update process*. Il veicolo richiede al RBC una nuova MA un certo tempo prima di raggiungere la Pre-Indication Location riferita alla MA precedente; tale tempo è da norma fissato a 7 secondi (*Fixed Value*) ed è indicato come  $T_{PreIndication}$ ;
- l'invio da parte del RBC a ciascun veicolo circolante nell'area di sua competenza. L'invio della MA è scaturito:
  - o da un qualsiasi aggiornamento di stato dell'interlocking come ad esempio la liberazione/occupazione di una sezione di blocco nell'area gestita; in tal caso si parla di *interlocking initiated MA update process*.
  - o ad intervalli di tempo prefissati;
  - o ad intervalli di spazio prefissati.

Nel caso in cui l'aggiornamento della MA è un IXL update process, l'evento iniziatorio di tale processo è il passaggio del veicolo su una boa fissa; infatti, solo in questo modo il veicolo è in grado di inviare la propria posizione corretta al RBC e quest'ultimo è in grado di conoscere lo stato di occupazione/liberazione delle sezioni di blocco. In particolare, il RBC necessita di due informazioni per aggiornare lo stato delle sezioni di blocco: la posizione dei veicoli (inviata al RBC da ciascun veicolo via GSM-R) e la verifica di integrità dei veicoli (accertata con i dispositivi di linea ed inviata al RBC dal sistema di Interlocking).

Indipendentemente da quale sia l'evento che origina il processo di aggiornamento della MA, bisogna considerare un tempo di trasmissione e di elaborazione delle componenti tecnologiche.

Il valore del track side reaction time per l'ETCS Livello 2 assume valori prossimi ai 4 secondi (Verkehrswissenschaftliches Institute – Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 2008).

In particolare, nel caso di ETCS L2 le azioni che il sotto sistema di terra e quello di bordo devono realizzare sono:

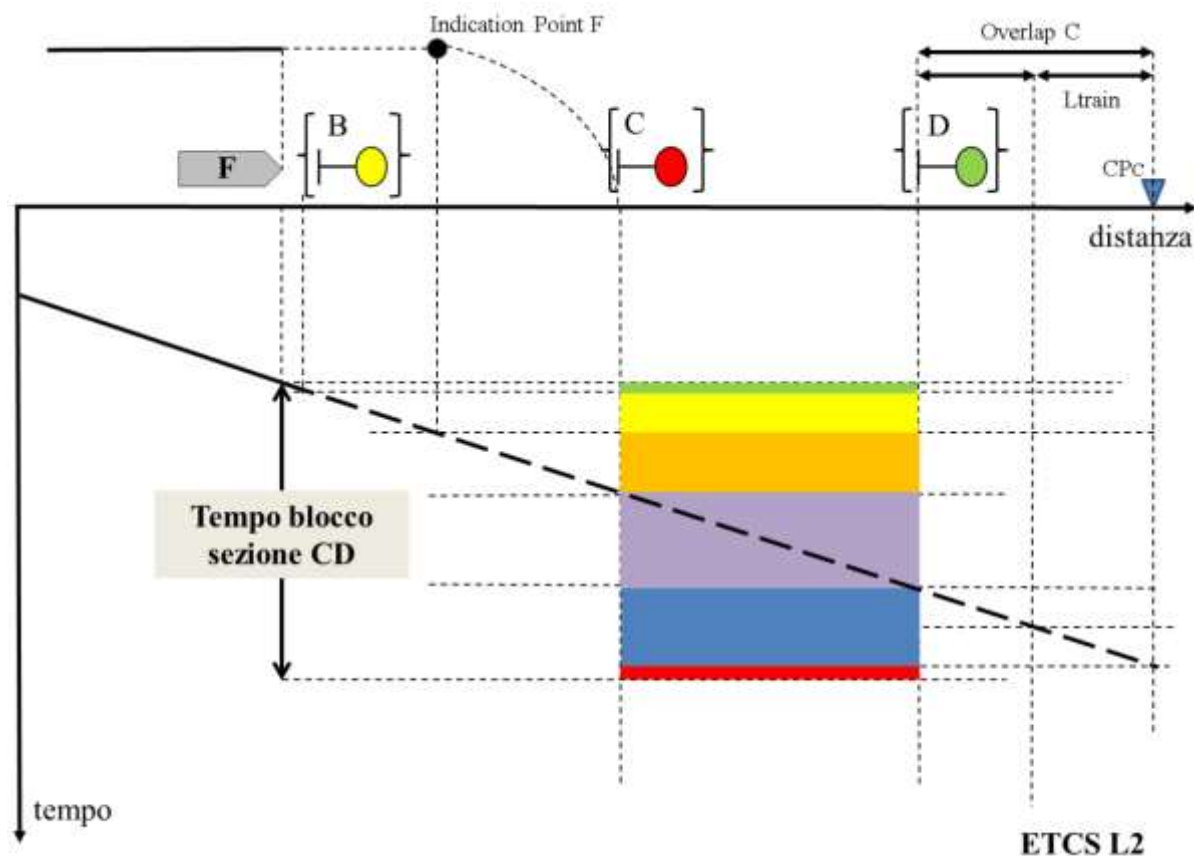
- verifica dell'integrità del veicolo da parte dell'interlocking ed invio dell'informazione al RBC;
- elaborazione dell'informazione pervenuta e della MA da parte del RBC;
- trasmissione della MA dal RBC al veicolo;
- elaborazione della MA, calcolo della curva di frenatura ad opera del computer di bordo e visualizzazione del messaggio di ingresso in zona di target speed monitoring sul cruscotto di guida.

Componenti	Tempo reazione medio [s]
IXL → RBC	0,05
RBC	1,5
RBC → Treno	1,1
EVC + MMI	1
Totale	3,65

**Tabella 2: Tempo di reazione del sistema per ETCS L2**

La composizione del tempo di blocco di una generica sezione resta invariata rispetto all'ETCS L1 con l'unica sostanziale differenza che l'inizio e la durata del tempo di approccio variano da veicolo a veicolo; infatti, tale aliquota del tempo di blocco è calcolata considerando la curva di frenatura di servizio specifica del veicolo ed è, quindi, indipendente dalla lunghezza dalla distanza di arresto standard con cui è progettato il layout delle sezioni di blocco.





**Figura 105: Tempo di blocco per ETCS L2**

### 3.7.4 Tempo di blocco per ETCS Livello 3

L'ETCS Livello 3 prevede un distanziamento con blocco mobile in cui non esiste più il concetto di sezione di blocco in quanto la MA viene definita in funzione dell'effettiva posizione della coda del veicolo leader. Allo stato attuale di sviluppo, l'ETCS Livello 3 è fondato sul blocco mobile assoluto (cd. *hard wall*).

Dal momento che la linea non è suddivisa in sezioni di blocco, il tempo di blocco si trasforma in una banda continua nello spazio: in ogni istante il convoglio occupa una porzione di tratta pari alla somma della distanza di arresto necessaria se dovesse iniziare a frenare nel punto considerato, la lunghezza del veicolo ed un margine di sicurezza (Verkehrswissenschaftliches Institute – Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 2008).

Per modellare il tempo di blocco in caso di ETCS Livello 3 con approccio *hard wall* si ipotizzano delle sezioni di blocco virtuali di piccola lunghezza (50 metri); in tal modo la banda di tempo continua nello spazio viene discretizzata in piccole sezioni in cui viene applicata la teoria del tempo di blocco.

Con le tecnologie disponibili oggi l'incremento di capacità ottenibile con un blocco mobile assoluto è relativamente piccolo se confrontato con l'ETCS L2 (Verkehrswissenschaftliches Institut - Aachen, 2008): per velocità massime di 300 km/h, il numero di sezioni di blocco  $n$  risulta pari a 6 in caso di ETCS L3 e quasi il doppio in caso di ETCS L2, ma la riduzione dell'headway è di circa 10 secondi.

Quindi, dal momento che il valore di decelerazione massimo è fissato da norma e non può essere aumentato per ragioni di comfort e sicurezza dei passeggeri e che gli altri perditempo sono vincoli tecnologici, l'unica aliquota sulla quale è possibile operare per ridurre il distanziamento è la distanza di arresto:

$$h_{min} = \frac{v}{2 \cdot d} + t_i$$

Per tali ragioni la prossima frontiera della ricerca di settore consiste nel rendere operativo l'ETCS livello 3 con blocco mobile relativo.

Tuttavia, dal momento che non esiste ancora una tecnologia che lo renda operativo non è possibile trovare in letteratura un modello di inseguimento treni sviluppato ad hoc per ETCS L3 soft wall.

Il valore del track side reaction time per l'ETCS Livello 3 assume valori prossimi ai 9 secondi (Verkehrswissenschaftliches Institute – Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 2008).

In particolare, nel caso di ETCS L3 le azioni che il sotto sistema di terra e quello di bordo devono realizzare sono:

- verifica dell'integrità del veicolo svolta dal sottosistema di bordo;
- trasmissione della posizione dal veicolo al RBC;
- tempo di elaborazione del RBC;
- trasmissione della MA dal RBC al veicolo;
- elaborazione della MA, calcolo della curva di frenatura ad opera del computer di bordo e visualizzazione del messaggio di ingresso in zona di target speed monitoring sul cruscotto di guida.

Componenti	Tempo reazione medio [s]
Integrità treno	4
Treno → RBC	1,1
RBC	1,5
RBC → Treno	1,1
EVC + MMI	1
Totale	8,7

**Tabella 3. Tempo di reazione del sistema per ETCS L3**

boa fissa  
GSM-R



Per garantire che una tale logica di distanziamento sia sicura bisogna prevedere tutte le possibili combinazioni di profili di decelerazione del leader e del follower; infatti, il valore di decelerazione è condizionato da molti fattori: aderenza, velocità, pendenza del tracciato, tipo di apparato frenante. Non solo, occorre considerare anche che sia la decelerazione di emergenza che quella di servizio variano tra un minimo ed un massimo in funzione della velocità.

179

Se si considerano due veicoli che viaggiano alla stessa velocità esistono due possibili configurazioni che garantiscono una marcia sicura con il minimo distanziamento possibile. Indicando con:

- SBMD<sub>L</sub>, la massima decelerazione di servizio del leader;
- SBmD<sub>L</sub>, la minima decelerazione di servizio del leader;
- SBMD<sub>F</sub>, la massima decelerazione di servizio del follower;
- SBmD<sub>f</sub>, la minima decelerazione di servizio del follower;
- EBmD<sub>F</sub>, la minima decelerazione di emergenza del follower;

la prima configurazione che garantisce la sicurezza di marcia assume che SBMD<sub>L</sub> > SBMD<sub>F</sub> e che la

SBmD<sub>f</sub> sia in grado di garantire la distanza di arresto con la EBmD<sub>F</sub>, cioè deve verificarsi che:

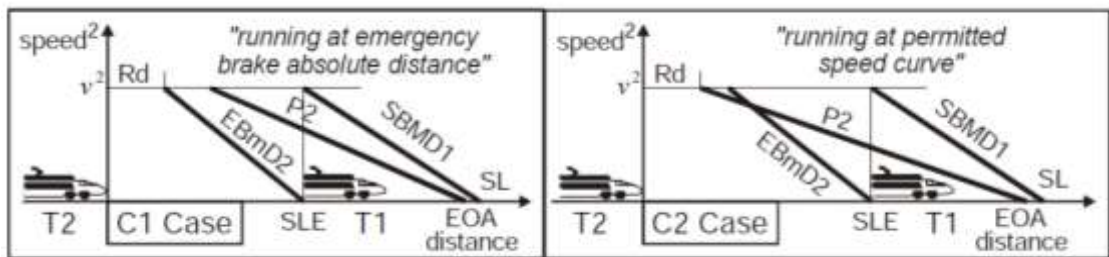
$$\frac{v_1^2 - v_2^2}{2 \cdot EBmD_F} \geq \frac{v_1^2 - v_2^2}{2 \cdot SBmD_F} - \frac{v_1^2 - v_2^2}{2 \cdot SBMD_L} - v_2 \cdot \left( \frac{v_1 - v_2}{SBmD_F} - \frac{v_1 - v_2}{SBMD_L} \right)$$

Tale disuguaglianza è verificata, ad esempio, se, essendo  $v_2 = 0$ ,  $SBmD_f \geq 1/2 \cdot EBmD_F$  e  $SBmD_f \geq 1/2 \cdot SBMD_L$ .

La seconda configurazione assume che il vincolo di sicurezza sia:

$$v_2 \cdot (v_1 - v_2) \cdot \frac{SBMD_L - P_F}{SBMD_L \cdot P_F} \geq 0$$

e tale disuguaglianza è verificata se  $SBMD_L > P_F$ .

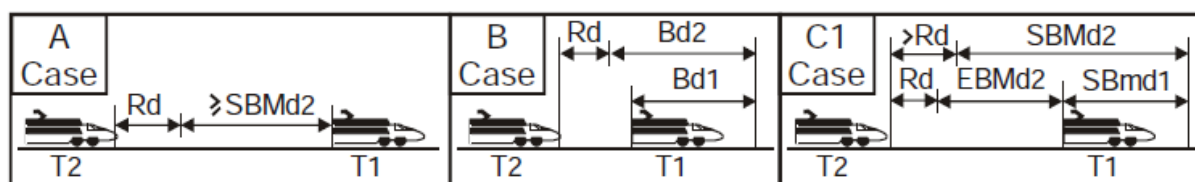


**Figura 107: Casi di arresto in sicurezza con blocco mobile relativo (Daniel, 2008)**

Come mostrato nella precedente figura, nella configurazione a sinistra (C1 case) la distanza minima di sicurezza tra i veicoli è pari alla somma della distanza di percezione e reazione ( $R_d$ ) e della distanza di arresto di emergenza con la minima decelerazione ( $EBmD_F$ ), mentre nella

configurazione di destra (C2 case) la distanza minima di sicurezza è pari alla somma di una distanza percorsa a velocità costante e maggiore della distanza di reazione ( $R_d$ ) e della distanza di arresto di servizio con la massima decelerazione di servizio ( $SBMD_F$ ).

Nella figura di seguito sono confrontate le distanze minime di sicurezza con i tre tipi di blocco possibile:



**Figura 108: Distanziamento con blocco mobile assoluto o relativo. Caso A: distanza di arresto assoluta di servizio. Caso B: distanza di arresto relativa di servizio. Caso C1: Distanza di emergenza massima relativa. Caso C2: Distanza di servizio massima relativa. (Daniel, 2008)**

Naturalmente per poter attuare un distanziamento con blocco mobile relativo (caso C) è necessario trasmettere ai veicoli più informazioni di quelle già previste dal Position Report nell'ETCS L2 ed L3. Infatti, nel position report sono trasmesse la posizione, l'integrità e la velocità del convoglio, ma la velocità non è fornita con accuratezza in quanto approssimata per multipli di 5 km/h. Inoltre, tali informazioni devono essere quanto più aggiornate possibili ciò equivale a dire che la frequenza di trasmissione deve essere molto elevata.

### 3.8 Il segnalamento sulle linee Alta Velocità: lo standard ERTMS/ETCS

L'European Railway Management System (ERTMS) è un ampio programma di ricerca e sviluppo europeo che riguarda tre ambiti principali nel trasporto ferroviario:

- Controllo/comando dei veicoli e segnalamento. Il programma specifico per questo settore viene indicato con gli acronimi ERTMS/ETCS;
- Telecomunicazioni. Con l'acronimo GSM-R si indica il sistema di radiotrasmissione digitale per tutti i tipi di comunicazione che interessano le ferrovie.
- Gestione del traffico. Il programma specifico per questo settore viene indicato con gli acronimi ERTMS/ETML European Traffic Management Layer.

Il programma nasce per conseguire due obiettivi: il primo consiste nel contribuire all'interoperabilità della rete ferroviaria trans europea, non solo all'interno delle frontiere dell'Unione Europea, ma anche dell'Europa centrale ed orientale e dei corridoi merci verso l'Asia

ed il Medio Oriente. L'interoperabilità della rete ferroviaria è motivata non solo dalla necessità di facilitare, migliorare e sviluppare i servizi di trasporto ferroviario internazionale, ma anche dalla volontà di realizzare gradatamente un mercato interno aperto e concorrenziale per la fornitura dei sistemi e servizi di costruzione, rinnovo, ristrutturazione e funzionamento del sistema ferroviario e stabilire l'uso di procedure armonizzate a livello europeo per la valutazione della conformità ai requisiti di interoperabilità.

Il secondo obiettivo consiste nell'ottimizzare le operazioni ferroviarie su scala europea, promuovendo redditività per le aziende di trasporto e rafforzando il servizio di assistenza ai clienti. Come conseguenza indiretta ciò porterà anche a realizzare gli obiettivi generali in termini di efficienza nei settori dell'ambiente, della sicurezza e dell'energia.

Il progetto europeo denominato *European Rail Traffic Management System* (ERTMS) è stato sviluppato a partire dal 1999 ed i soggetti coinvolti nel processo di sviluppo sono:

- la Commissione Europea che ha riconosciuto l'importanza dell'interoperabilità ed ha riconosciuto la necessità di destinare dei fondi a tale scopo;
- l'UIC (International Union of Railways) che è l'ente regolatore cioè che definisce le norme funzionali del sistema;
- l'UNISIG che è un consorzio costituito dagli 8 principali produttori di sistemi di segnalamento (Alstom Transport, Ansaldo STS, AZD Praha, Bombardier Transportation, Invensys Rail, Mermec, Siemens Mobility, Thales). Esso ha il compito di sviluppare le soluzioni tecnologiche di dettaglio del sistema che sono specificate nelle cosiddette "Norme UNISIG".

L' *European Train Control System* (ETCS) è lo standard normativo nato per le linee ad alta velocità e specifico per il segnalamento, il comando ed il controllo della marcia del treno ed è stato progettato per sostituire i numerosi sistemi di sicurezza utilizzati sulle linee ferroviarie europee che sono spesso tra loro incompatibili. Le reti ferroviarie europee si sono sviluppate nel tempo come singole reti nazionali presentando ben poche caratteristiche comuni eccetto lo scartamento standard. Le differenze sostanziali includono diverse tensioni di esercizio, sagome dei veicoli, sistemi di giunzione, impianti di segnalamento e di sicurezza.

L' ETCS nasce proprio con l'obiettivo di uniformare queste differenze e rendere le reti interoperabili: l'ETCS intende creare un sistema di comando dei treni armonizzato a livello europeo.

Le norme UNISIG definiscono 5 diversi livelli operativi del sistema ETCS:

- Livello 0;
- Livello STM (Specific Transmission Module);

- Livello 1;
- Livello 2;
- Livello 3.

La definizione del livello operativo:

- dall'attrezzatura presente sulla linea;
- dalle informazioni trasmesse da terra che il sottosistema di bordo è in grado di elaborare;
- dalle funzioni svolte rispettivamente dall'unità di bordo e dall'attrezzatura di linea.

La compatibilità tra i diversi livelli operativi è del tipo “top-bottom” cioè un veicolo dotato di attrezzatura e funzionalità di ETCS L3 può viaggiare su una linea con un livello operativo ETCS L2 e così via.

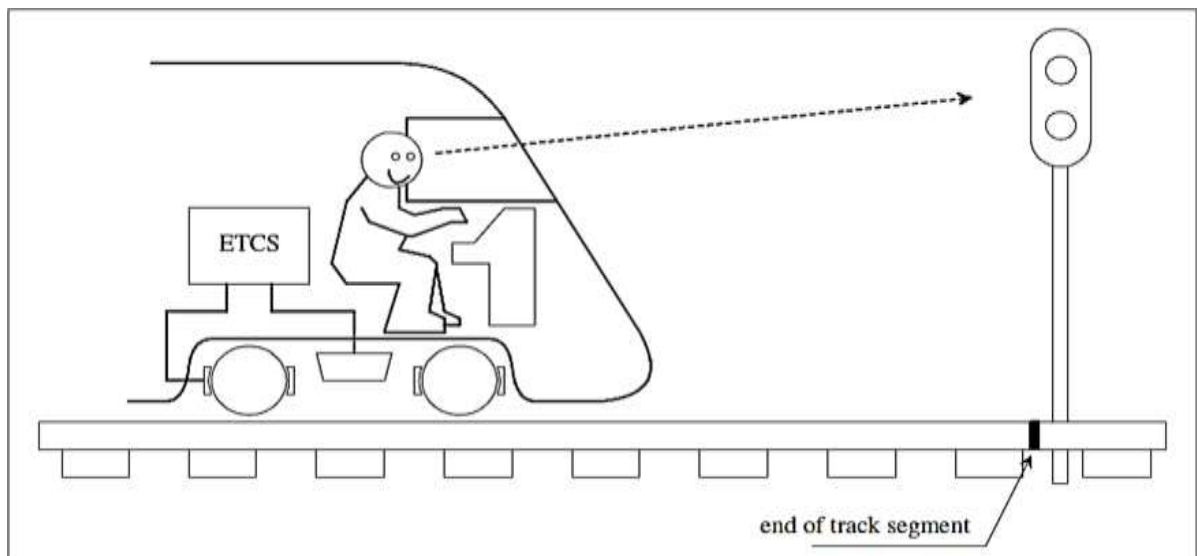
### 3.8.1 I livelli operativi dell'ETCS

#### 3.8.1.1 ETCS – Livello 0

Le norme UNISIG definiscono il Livello 0 come una condizione operativa in cui un treno attrezzato con ERTMS/ETCS marcia su una linea non attrezzata con ERTMS/ETCS.

In tale circostanza i dispositivi del segnalamento di terra non riescono ad interfacciarsi con il sottosistema di bordo e, quindi, la marcia è regolata osservando i segnali luminosi.

Dal momento che l'aspetto dei segnali assume diversi significati da linea a linea, questo livello obbliga il cambio di macchinista nel passaggio da una rete nazionale ad un'altra.



**Figura 109: Operatività ETCS Livello 0**

<p><b>Attrezzatura di linea:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Eurobalises per annunciare la transizione da un livello ad un altro ed altri comandi specifici.</li> </ul> <p><b>Funzioni principali del sottosistema di linea ERTMS/ETCS :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Nessuna.</li> </ul> <p><b>Attrezzatura di bordo:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dispositivo a bordo per la lettura ed interpretazione delle Eurobalises.</li> </ul> <p><b>Funzioni principali del sottosistema di bordo ERTMS/ETCS:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Supervisione della velocità massima del treno;</li> <li>• Supervisione della velocità massima consentita di linea (in genere valore nazionale definito per il livello 0).</li> <li>• Lettura Eurobalises per rilevare transizione di livello ed altri comandi specifici. Tutti gli altri messaggi vengono ignorati.</li> <li>• No cab signalling.</li> </ul>
--

**Figura 110: Scheda riassuntiva ETCS Livello 0**

### 3.8.1.2 ETCS – Livello STM

Le norme UNISIG definiscono il Livello 0 come una condizione operativa in cui un treno attrezzato con ERTMS/ETCS marcia su una linea attrezzata con un sistema di segnalamento nazionale interfacciabile. Un' attrezzatura supplementare a bordo del veicolo, definita *Specific Transmission Module* (STM), consente ai diversi sistemi nazionali di sicurezza della marcia dei treni di essere letti ed interpretati dall'apparecchiatura ETCS del veicolo. Questo è il modo in cui, durante un periodo di transizione, i sistemi di sicurezza in uso vengono integrati nell'ETCS utilizzando attrezzature a bordo e senza il bisogno di investire nell'attrezzatura dell'infrastruttura.

Tuttavia, l'infrastruttura è definita *interoperabile* se realizza sia l'interoperabilità tecnica che quella operativa. L'interoperabilità tecnica consiste nella compatibilità degli impianti di terra con l'attrezzatura di bordo, mentre l'interoperabilità operativa implica la non necessaria conoscenza del sistema di segnalamento nazionale esistente da parte del personale di macchina.

In questo caso non è verificata l'interoperabilità operativa in quanto l'operatore di macchina deve marciare comunque osservando i segnali luminosi nazionali.



### 3.8.1.3 ETCS – Livello 1

Le norme UNISIG definiscono il Livello 0 come una condizione operativa in cui un treno attrezzato con ERTMS/ETCS viaggia su una linea attrezzata con boe del tipo *Eurobalises* oppure circuiti di binario in audiofrequenza del tipo *Euroloop* oppure sistema *Radio infill*.

L'ETCS livello 1 prevede un segnalamento con trasmissione discontinua ed attua il distanziamento con blocco fisso; pertanto, la linea è suddivisa in sezioni di blocco.

L'aspetto del segnale ed i dati del tracciato sono trasmessi al veicolo tramite delle antenne passive poste sulle traverse dei binari e definite dallo standard ETCS *Eurobalise*. Le Eurobalise trasmettono un telegramma che contiene la posizione del segnale rosso a valle. L'aspetto di ciascun segnale di linea è captato e codificato in telegramma da un adattatore definito *Lineside Electronics Unit* (LEU) posto in prossimità del segnale luminoso.

In base a questi dati trasmessi dalla boa il calcolatore di bordo calcola la curva di frenatura.

L'operatore di bordo regola la marcia in base alla curva di frenatura visualizzata sul cruscotto.

Poiché viene utilizzata la trasmissione di tipo discontinuo, il convoglio deve transitare sulla relativa Eurobalise per poter ricevere un'informazione aggiornata.

Esistono due varianti del livello operativo 1: con funzione infill e senza funzione infill.

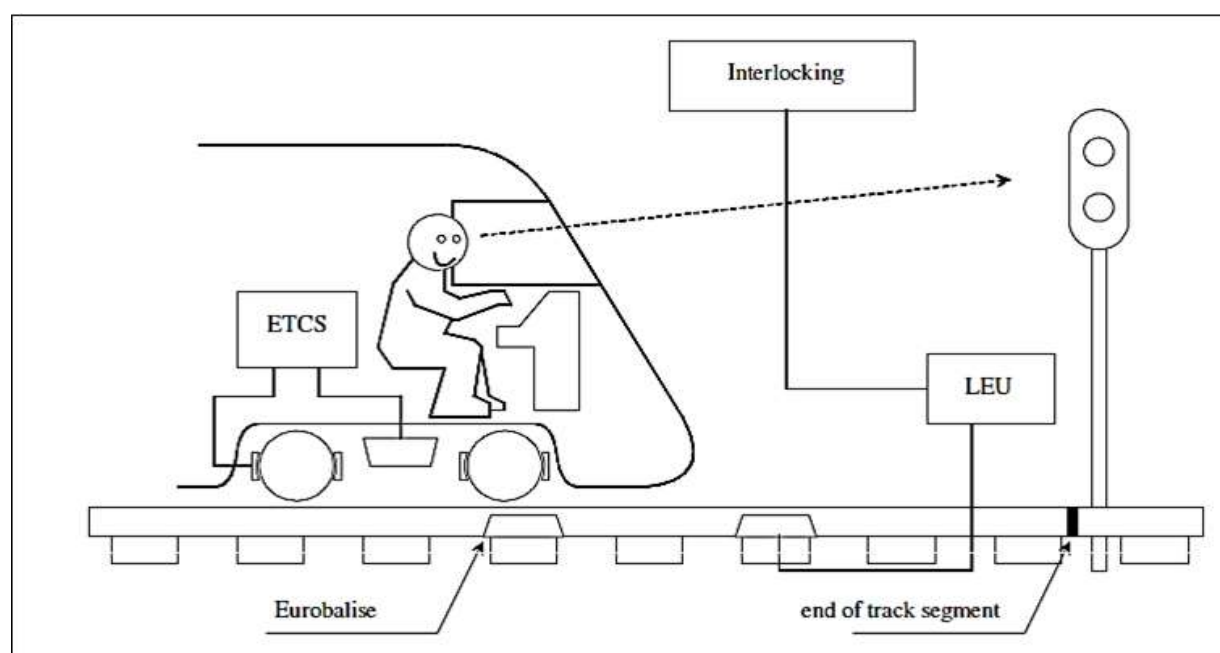
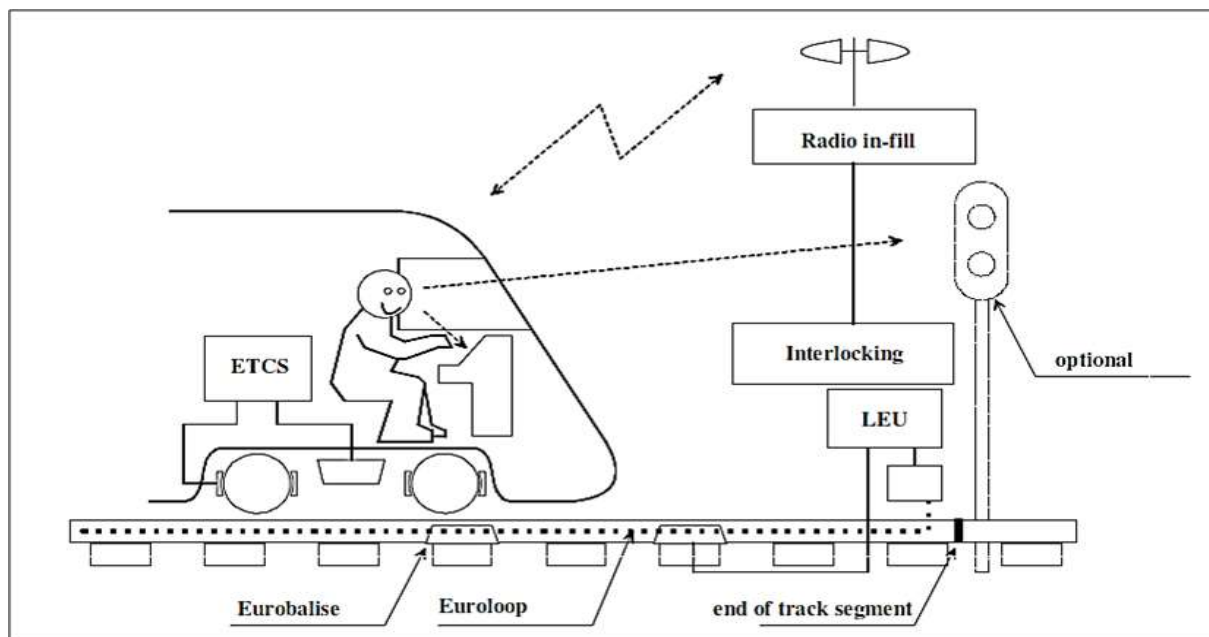


Figura 111: Operatività ETCS Livello 1



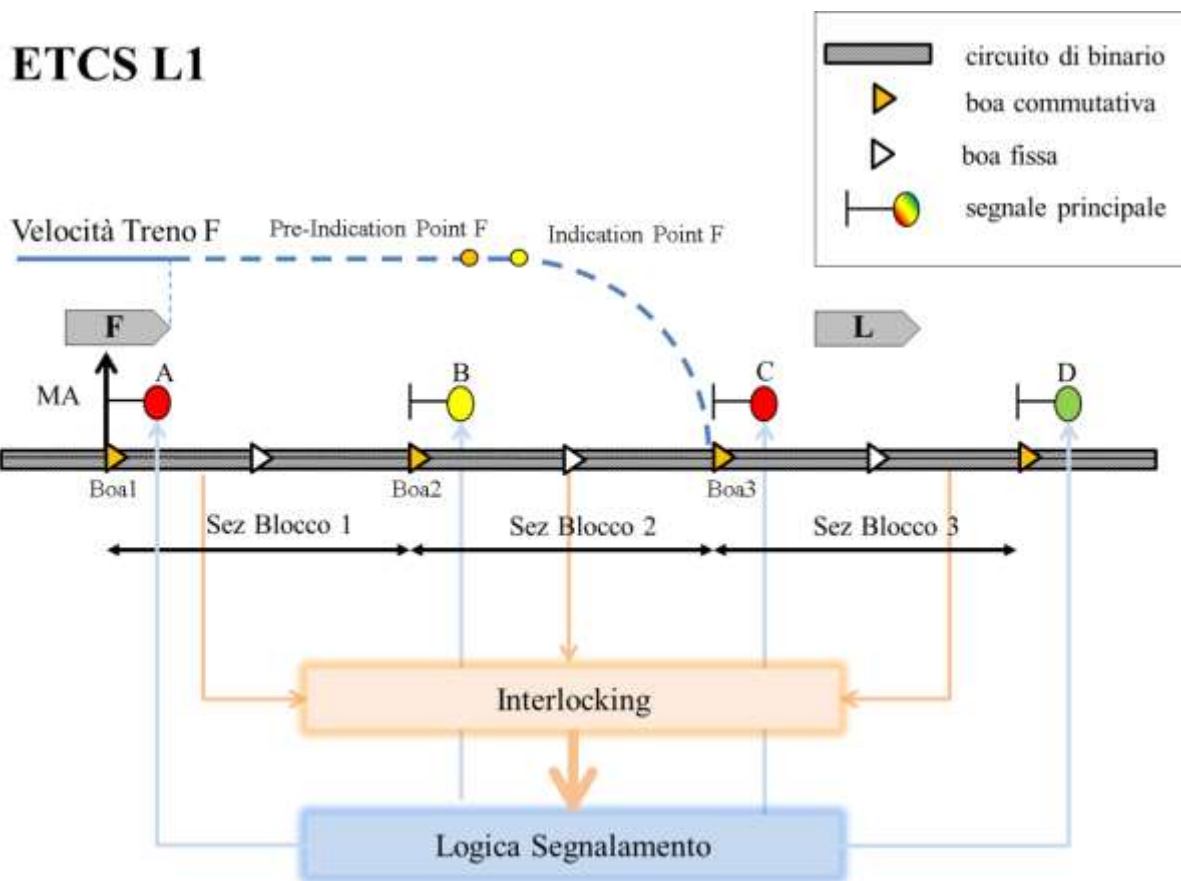
**Figura 112: Operatività ETCS Livello 1 con Infill**

La funzione infill consiste nel trasmettere l'informazione aggiornata con continuità in un tratto prossimo al termine della sezione di blocco cioè, in sostanza, consiste in un'anticipazione dell'informazione trasmessa da una euroblaise.

La variante senza Infill è descritta, in dettaglio, con riferimento alla seguente figura, nel livello operativo 1 sono necessarie le diverse componenti tecnologiche:

- circuiti di binario, sono necessari sia per rilevare la posizione dei veicoli che la loro integrità. Il sistema di interlocking è l'apparato di dispositivi che hanno la funzione di rilevare lo stato di occupazione/liberazione delle sezioni di blocco, la posizione e fermascambiatrice dei deviatori e di tutti gli enti di piazzale manovrabili. L'interlocking opera seguendo le logiche del segnalamento e predispone l'aspetto dei segnali.
- boe commutative (Eurobalise), sono necessarie per trasmettere direttamente in cabina l'aspetto del segnale. Dal momento che il layout delle sezioni di blocco è progettato in base alla distanza di arresto del veicolo con le prestazioni frenanti peggiori, la posizione delle boe commutative coincide con quella dei segnali luminosi. Quando il veicolo transita su una boa commutativa riceve la posizione aggiornata del segnale rosso a valle (che può trovarsi ad una o più sezioni di blocco avanti) ed altri dati in un telegramma definito telegramma di *Movement Authority* (MA) .
- segnali luminosi, sono necessari in caso di guasto delle boe commutative; in tale circostanza si attua un regime di circolazione degradato con velocità ridotte e la marcia è regolata con l'aspetto dei segnali a vista.

- boe fisse, necessarie per la correzione degli errori del sistema odometrico a bordo veicoli. Queste boe trasmettono un'informazione statica cioè non dipendente dallo stato delle sezioni di blocco.



**Figura 113: Componenti tecnologiche nell'ETCS Livello 1**

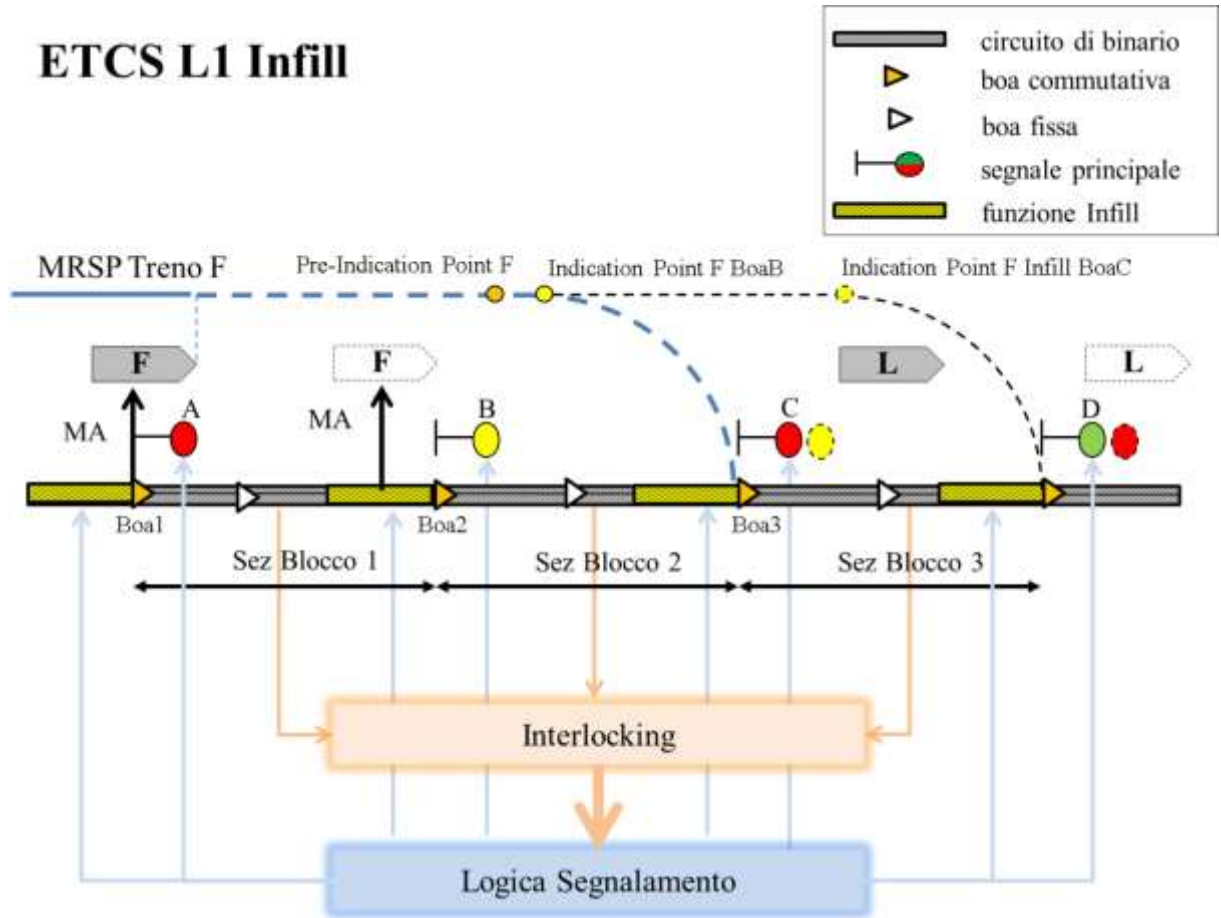
L'inserimento di ulteriori Eurobalises, definite *Balises Infill*, o di un'antenna distribuita lungo una parte del binario (EuroLoop) permette un infittimento delle informazioni. L'EuroLoop è il prolungamento funzionale dell'Eurobalise per una determinata distanza e consente la trasmissione semicontinua dei dati al veicolo per mezzo di un cavo elettrico radiante.

La funzione Infill può essere realizzata in alternativa con un sistema di radiotrasmissione digitale Global System Mobile | Railway (GSM|R) grazie al quale il personale di terra può comunicare con il personale di bordo.

Tale livello funzionale dell'ETCS realizza un sistema ATP con trasmissione discontinua cioè a mezzo di boe.

La seguente figura mostra il funzionamento:

## ETCS L1 Infill



**Figura 114: Componenti tecnologiche nell'ETCS livello 1 Infill**

Il dispositivo infill, in sostanza, anticipa l'informazione aggiornata che il veicolo capterebbe alla boa commutativa successiva. In particolare, possono verificarsi tre casi: la MA aggiornata prevede lo stesso segnale rosso di quella precedente, uno più prossimo oppure uno più distante.

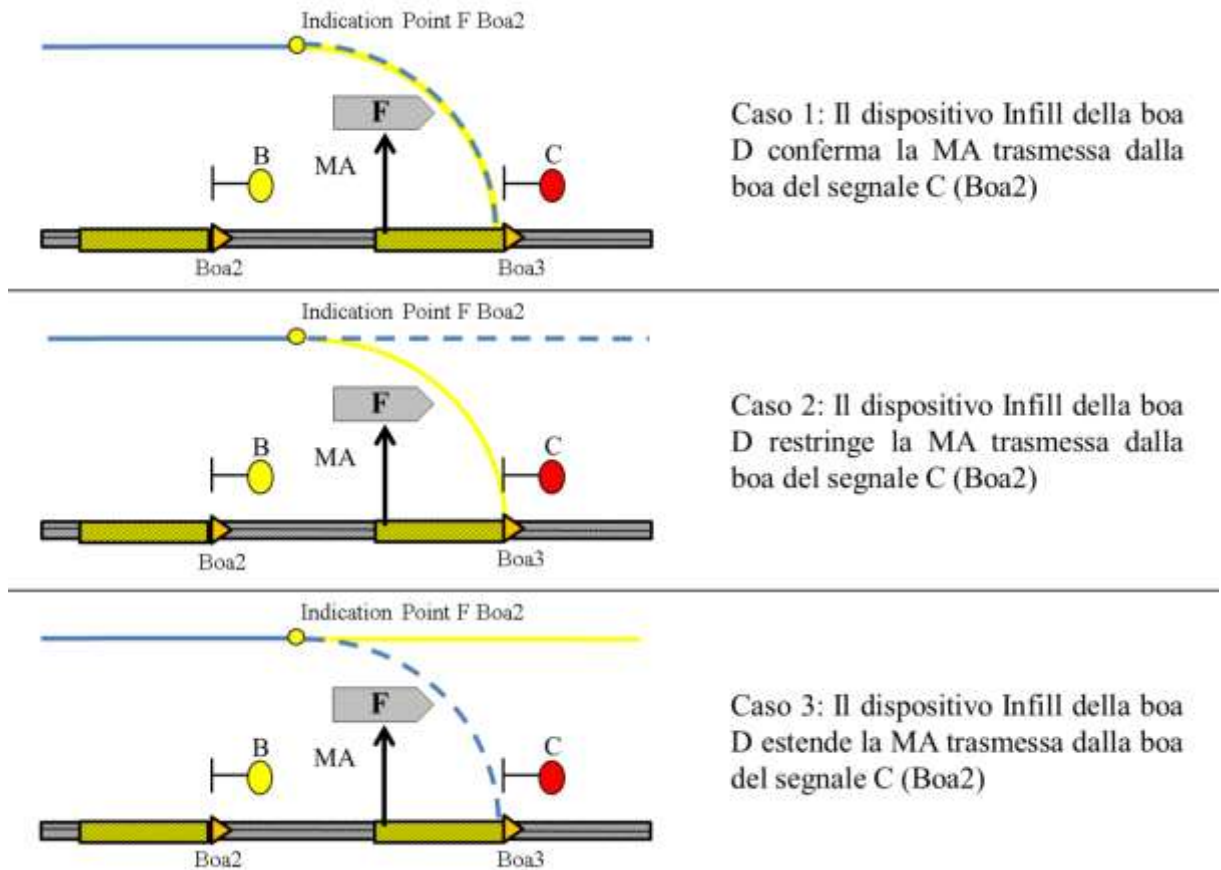


Figura 115: Aggiornamento della Movement Authority con dispositivo infill

<p><b>Attrezzatura di terra:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Eurobalises commutative per la trasmissione discontinua terra-bordo;</li> <li>• Circuiti di binario (occupazione binario + integrità treno)</li> </ul> <p><b>Funzioni principali del sottosistema di terra ERTMS/ETCS:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Determinare la Movement Authority nel rispetto del segnalamento e della posizione di tutti i treni in linea;</li> <li>• Trasmettere la MA ed i dati del tracciato al bordo.</li> </ul> <p><b>Attrezzatura di bordo:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dispositivo di lettura e codifica messaggi Eurobalise.</li> <li>• Dispositivo di lettura e codifica Euroloop se è presente la funzione infill.</li> <li>• Dispositivo di lettura e codifica Radio se è presente la funzione infill.</li> </ul> <p><b>Funzioni principali del sottosistema di bordo ERTMS/ETCS:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ricezione e codifica della MA e dei dati di tracciato trasmessi da terra.</li> <li>• Calcolo del dynamic speed profile in considerazione delle caratteristiche di velocità/decelerazione del treno (note al bordo) e delle caratteristiche del tracciato.</li> <li>• Confronto tra la velocità attuata dal treno e quella consentita ed applicazione automatica della frenatura se necessario.</li> <li>• Ripetizione del segnale in cabina.</li> </ul>
--

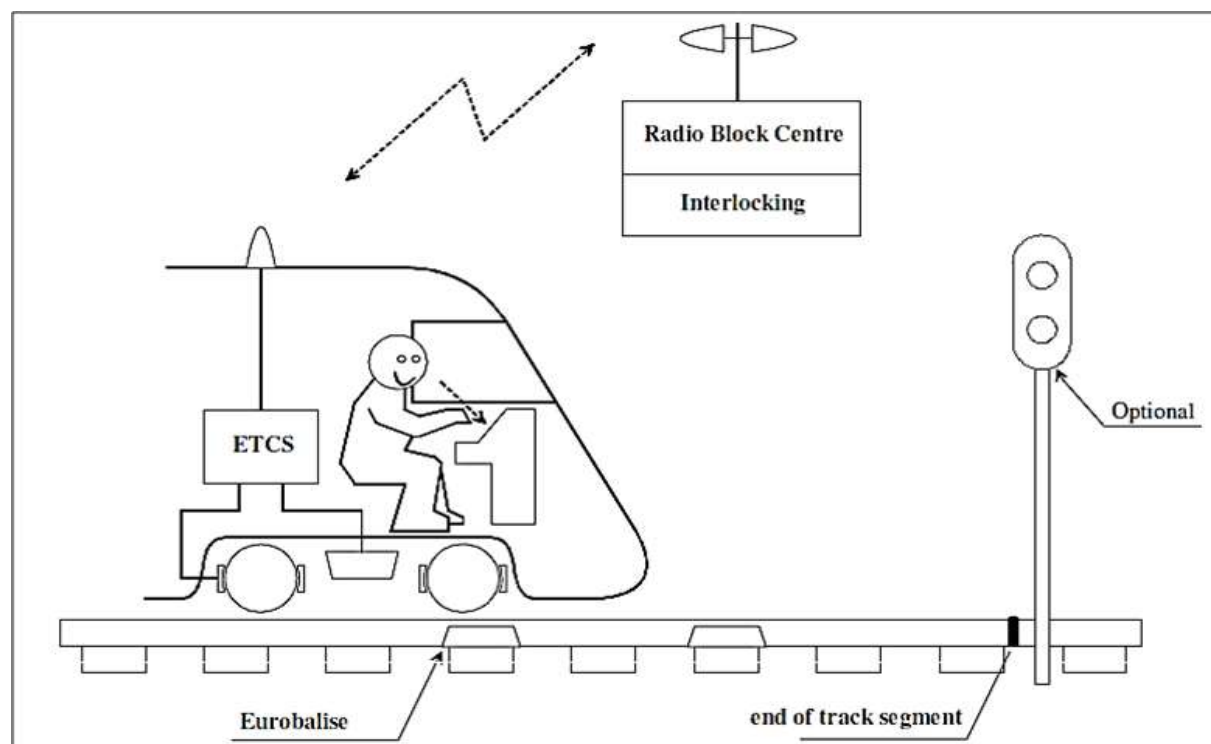
Figura 116: Scheda riassuntiva ETCS Livello 1

### 3.8.1.4 ETCS – Livello 2

Le norme UNISIG definiscono il Livello 0 come una condizione operativa in cui un treno attrezzato con ERTMS/ETCS marcia su una linea controllata da un *Radio Block Centre* (RBC) ed attrezzata con Eurobalises ed Euroradio con localizzazione del treno e verifica dell'integrità del treno realizzate dal sottosistema di terra.

L'ETCS Livello 2 si basa su un distanziamento a blocco fisso e, quindi, la linea è ancora suddivisa in sezioni di blocco.

Tale livello prevede una trasmissione delle informazioni a attraverso onde radio (GSM-R): la Movement Authority è trasmessa in modo pressoché continuo nel tempo dal RBC a ciascun veicolo. Ad esclusione dei nodi in cui sono presenti deviatoi, i segnali luminosi non sono più necessari.



**Figura 117: Operatività ETCS Livello 2**

Le componenti tecnologiche del sottosistema di terra e di bordo necessarie per l'ETCS L2 sono descritte, in dettaglio, con riferimento alla seguente figura:

- circuiti di binario, sono ancora necessari per verificare l'integrità dei veicoli. Mentre la posizione dei veicoli è trasmessa al RBC via GSM-R.
- boe fisse, necessarie per la correzione degli errori del sistema odometrico a bordo veicoli.

Le boe vengono utilizzate come boe passive (che si attivano solo al passaggio di un convoglio) di localizzazione. Il calcolatore di bordo sorveglia costantemente i dati trasmessi e la velocità massima consentita dalle caratteristiche del materiale rotabile e dell'infrastruttura comandando in automatico la frenatura di emergenza se necessario.



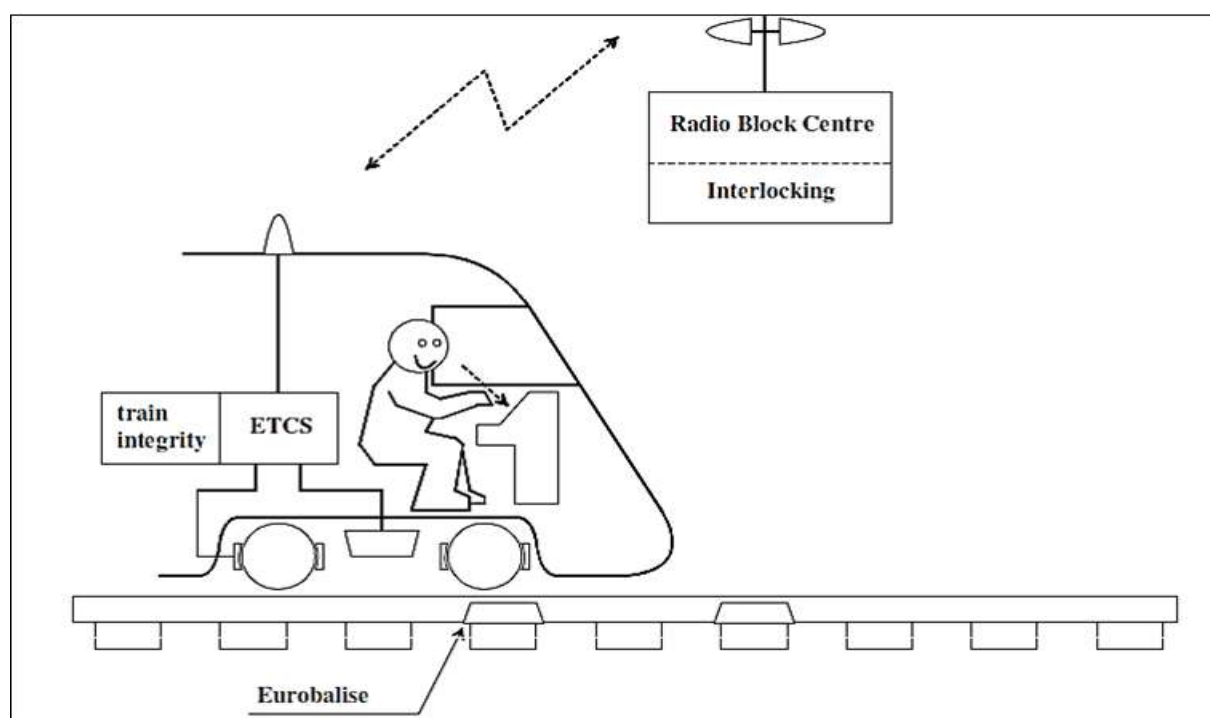
Costituisce il livello funzionale più evoluto sia dal punto di vista funzionale che tecnologico, ma è ad oggi ancora in via di sperimentazione.

191

attrezzata con Eurobalises ed Euroradio con localizzazione del treno e verifica dell'integrità del treno realizzate dal sottosistema di bordo.

Nel livello 3 non sono più necessari i dispositivi per la rilevazione del binario libero (circuiti di binario o conta assi) che sono, invece, ancora necessari nel livello 2 per la verifica della completezza del treno. Come per il livello 2, i convogli si auto localizzano tramite eurobalise di localizzazione (anche se sono già in sperimentazione tratte con uso di GPS per la localizzazione dei veicoli) ed inoltrano tale informazione al RBC.

L'autorizzazione al transito sulla tratta non viene più trasmessa per sezioni di tratta a distanza predefinita, ma considerando l'effettiva posizione della coda del veicolo leader. Con il livello 3 si abbandona la classica circolazione a blocco fisso ed il distanziamento dei treni avviene secondo il principio di circolazione del blocco mobile.



**Figura 119: Operatività ETCS Livello 3**





## 4 I modelli di simulazione del traffico ferroviario

### 4.1 Introduzione

I modelli di simulazione del traffico ferroviario sono utilizzati sia nel settore accademico che in quello professionale per valutare la qualità e le prestazioni del servizio di trasporto.

Infatti, sono stati sviluppati modelli sia per l'analisi di stabilità delle reti ferroviarie (Nordeen, 1996) che per la progettazione robusta degli orari di servizio (Middelkoop & Bouwmann, 2002) che, ancora, per la progettazione ottimale dei sistemi di segnalamento per incrementare la capacità (Gill & Goodman, 1992), (Chang & Du, 1999) che, infine, per ottimizzare il consumo energetico (Ke, Chen, & Lin, 2009).

Generalmente, per definire un modello del sistema di trasporto ferroviario si individuano i sottosistemi *infrastruttura*, *materiale rotabile* e *orario di servizio*.

La tecnica più diffusa per rappresentare l'infrastruttura ferroviaria si basa sulla Teoria dei Grafi (Hauptmann, 2000), (Radtke & Watson, 2007) che consente di descrivere la rete ferroviaria attraverso un modello matematico in grado di riprodurre la sua complessità.

La Teoria dei Grafi prevede, appunto, che l'infrastruttura sia rappresentata attraverso un grafo costituito da *archi* e *nodi*. Ogni tronco infrastrutturale, pertanto, è scomposto in uno o più archi ed a ciascun arco sono assegnati degli attributi quali pendenze, raggi di curvatura, ecc.; ciascun arco ha un unico valore per ogni specifico attributo. Gli archi sono, quindi, connessi tra loro attraverso i nodi.

Un nodo nel grafo può rappresentare una semplice connessione tra archi, e quindi non corrispondere ad alcun elemento fisico reale, oppure un elemento reale quale un segnale luminoso di linea o, ancora, può essere un nodo critico cioè rappresentare un'intersezione, un deviatoio o una stazione.

Ad ogni nodo possono essere assegnati diversi attributi come ad esempio la posizione geografica e la progressiva corrispondente sul tracciato planimetrico ferroviario.

La struttura del grafo consente, inoltre, di attribuire a ciascun arco e/o nodo un costo e, quindi, di poter valutare le prestazioni della rete ferroviaria.

I grafi possono essere classificati in base al modo in cui due nodi consecutivi sono connessi in:

- *diretti* se due nodi consecutivi sono connessi da almeno un arco che è, generalmente, orientato cioè può essere percorso in un unico verso;
- *semplici* se nel grafo non esistono archi con stessa direzione o percorsi ciclici;
- *connessi* se esistono due nodi connessi da più archi.

Le applicazioni più comuni dei modelli di infrastruttura a grafi sono, ad esempio, il calcolo del percorso più breve che connette due nodi (Dijkstra, 1959) o il calcolo dei flussi di traffico massimi o minimi considerando i vincoli di capacità su archi e nodi (Schumacher, 2004), (Radtke, Software tools to model the railway operation, 2005).

A seconda del modo in cui sono assegnati gli attributi agli elementi del grafo i modelli di rete possono essere classificati in:

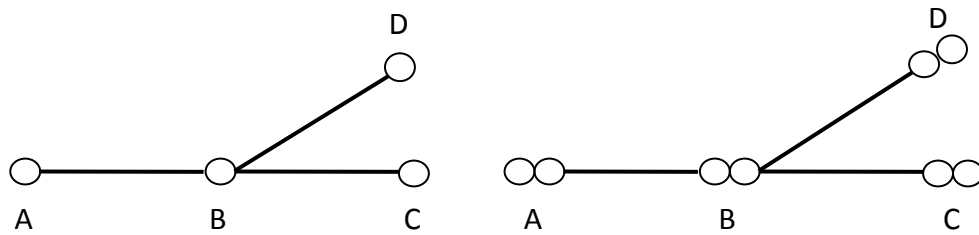
- *link-oriented* se tutti i dati infrastrutturali necessari alla simulazione sono assegnati agli archi;
- *node-oriented* se agli archi non è assegnato alcun attributo e sono utilizzati nodi speciali per indicare il cambio di valore di un attributo nel passaggio da un arco all'altro. Ciascun nodo è caratterizzato da coordinate spaziali e, quindi, la lunghezza di un arco è ricavata come differenza tra le coordinate dei nodi che unisce.

Se da un lato il grafo *link-oriented* necessita di memoria maggiore per archiviare i dati (assegnando a ciascun arco i valori degli attributi si verifica una certa ridondanza di dati), dall'altro risulta migliore nel caso di modifiche (cambio di valori degli attributi o aggiunta di nuovi elementi) in quanto consente di intervenire solo gli archi interessati e di poter dividere in due archi un arco preesistente.

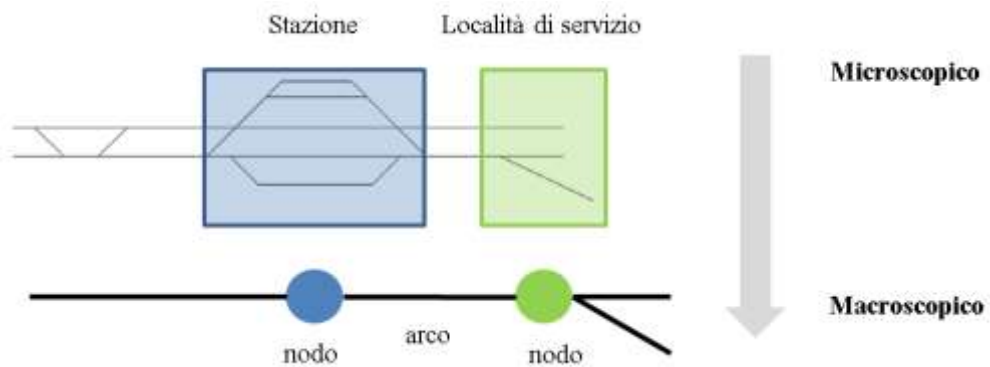
Sicuramente il problema della gestione delle grandi quantità di dati così come quello della capacità di immagazzinamento sono stati risolti dal progresso nel settore informatico.

Il grafo *node-oriented*, invece, risolve il problema della ridondanza dei dati. Infatti, se ad esempio due archi differiscono per il valore del raggio di curvatura è necessario introdurre un nuovo nodo speciale per definire la variazione di attributo o modificare un nodo esistente. Tuttavia, l'assegnazione degli attributi ad un arco della rete prevede l'applicazione di complessi algoritmi il che risulta particolarmente dispendioso considerando l'estensione dei tracciati ferroviari.

Un altro modello di rete basato sull'utilizzo dei grafi prevede l'uso di cosiddetti "nodi doppi". Questo tipo di nodi consente di gestire facilmente il verso di percorrenza di un arco: si pensi, ad esempio, ai tronchi di linea banalizzata cioè ai binari che possono essere percorsi in entrambi i versi di marcia oppure ai tronchi di manovra con deviatori. Infatti, come mostrato nella seguente figura, il grafo a nodi doppi consente di imporre che l'unico percorso possibile dal nodo D al nodo A sia D-B-A (per la presenza del deviatore) cioè che se il veicolo proveniente da D incontra per prima la parte del nodo doppio B collegata al nodo C esso può proseguire solo verso il nodo A.



**Figura 121. I grafi a nodi semplici ed a nodi doppi**



**Figura 122. Confronto tra il modello di rete microscopico e macroscopico**

Tuttavia, la classificazione più diffusa dei modelli di rete si basa sul livello di dettaglio con il quale è rappresentata l'infrastruttura ferroviaria. In base a tale criterio si distinguono:

- microscopici;
- mesoscopici;
- macroscopici.

Se, invece, il criterio di classificazione si basa sul modo in cui viene riprodotta l'occorrenza degli eventi si distinguono modelli:

- stocastici;
- deterministici.

Se, infine, il criterio di classificazione si basa sulle tecniche con cui sono processati gli eventi si distinguono modelli:

- sincroni;
- asincroni.

Di seguito si presenterà una descrizione sommaria delle diverse classi di modelli con un focus sui principali vantaggi e svantaggi nelle applicazioni pratiche.

## 4.2 I modelli di simulazione macroscopici

I modelli macroscopici forniscono una rappresentazione molto approssimata della rete reale cioè con un livello di dettaglio basso. Infatti, si ricorre a tali modelli in fase di progettazione preliminare di un sistema di trasporto poiché le componenti infrastrutturali non sono ancora definite in dettaglio oppure nell'ambito della gestione del sistema di trasporto per la pianificazione a lungo termine.

In un modello macroscopico, quindi, sia una stazione terminale che una località di servizio sono rappresentati da un nodo; pertanto, la simulazione della circolazione in ambito stazione è praticamente impossibile.

Attributi tipici che possono essere assegnati ad un nodo sono, ad esempio, le coordinate spaziali, il nome della stazione/fermata/località di servizio, il tipo di nodo (stazione/fermata/località di servizio).

Mentre, tipici attributi assegnati ad un arco possono essere: lunghezza, tipo di linea (AV, metropolitana, ferroviaria, ecc), numero di linee a cui appartiene, tempo medio di attraversamento, capacità media.

Un esempio di applicazione di un modello macroscopico è l'individuazione di possibili percorsi su una rete senza vincoli sul tempo di percorrenza per aggiungere nuove corse (Sewczyk, Radtke, & Wilfinger, 2007). Attraverso un processo a due stadi si individua dapprima un possibile percorso del convoglio (un modello macroscopico identifica un percorso come una sequenza di stazioni) adottando criteri diversi di selezione come, ad esempio, il massimo carico per asse consentito, i tipi di elettrificazione della linea, la lunghezza del percorso, ecc., per affinare il percorso trovato successivamente utilizzando un modello microscopico in cui si rappresenterà, però, solo la soluzione ottenuta nel primo step.

Sicuramente i modelli macroscopici non consentono di calcolare con esattezza i tempi di percorrenza o di individuare i punti di conflitto nell'allocazione delle sezioni di blocco. Infatti, le restrizioni di velocità dovute sia ai vincoli infrastrutturali che al distanziamento in sicurezza dei convogli (segnalamento) non sono applicabili.

D'altro canto anche lo studio del moto del veicolo con un modello dinamico sarebbe oltremodo approssimativo dal momento che è stato dimostrato che l'utilizzo di valori medi per le grandezze geometriche del tracciato (pendenze, raggi di curvatura, ecc) porta a sottostimare o sovrastimare i tempi di percorrenza in modo non trascurabile.

Nel panorama europeo i modelli macroscopici che hanno riscosso maggior successo sono il modello Nemo ed il modello SIMONE.

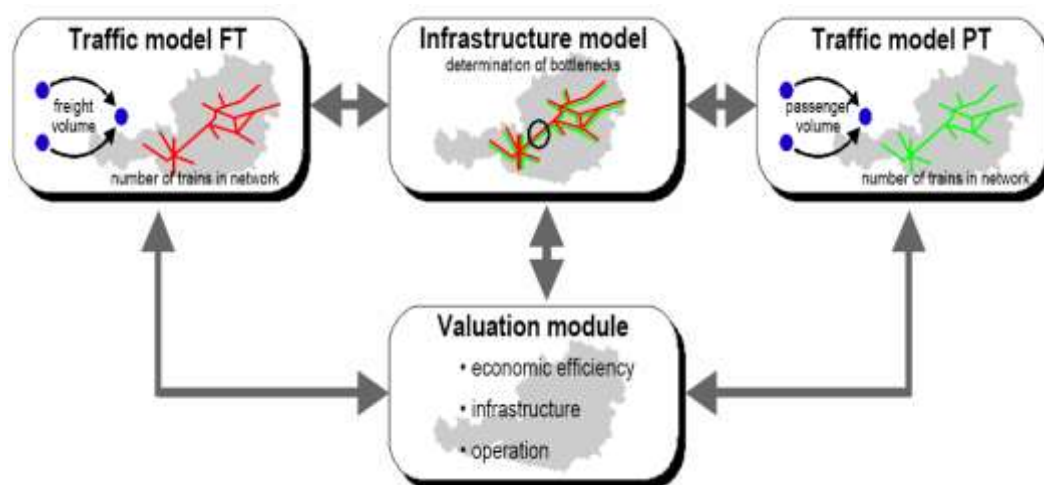
#### 4.2.1 Il modello NEMO

L'acronimo NEMO sta per "Network Evaluation Model" ed è un tool sviluppato dall' I.V.E. (Institute of Transport Railway Construction and Operation) presso l' Università di Hannover in collaborazione con l'ÖBB (Austrian Federal Railways).

Il tool NEMO utilizza un modello macroscopico con rete a grafo del tipo link-oriented ed è sostanzialmente utilizzato per studiare l'interazione tra offerta (intesa come infrastruttura e timetable) e domanda di trasporto (Kettner, 2001,2002,2003).

Grazie a questo tool è possibile definire diversi scenari di simulazione sia per il trasporto passeggeri che merci: la definizione di uno scenario prevede una specifica configurazione dell'infrastruttura e della produttività del sistema di trasporto al fine di verificare la soddisfazione della domanda ed individuare eventuali "colli di bottiglia" nella rete. Il tool è, prevalentemente, utilizzato per la valutazione della convenienza degli investimenti e per confrontare diverse alternative di intervento.

Il tool è composto da quattro moduli:



**Figura 123. Struttura del tool NEMO (Kettner et al. 2003)**

- Il modulo *Infrastructure* è utilizzato per rappresentare la rete come grafo link-oriented in cui i nodi individuano le stazioni, le intersezioni, ecc. e gli archi le tratte tra essi compresi. E' possibile rappresentare anche i punti di accesso all'infrastruttura (i cd. *centroidi*) sia per il trasporto passeggeri che merci.
- Il modulo *Traffic* consente di simulare l'esercizio ferroviario con diverse categorie di materiale rotabile e fornisce come dati in uscita i tempi di percorrenza per ciascuna categoria di treni e riferiti a ciascuna tratta inter stazione, i distanziamenti minimi, la velocità media ed altri

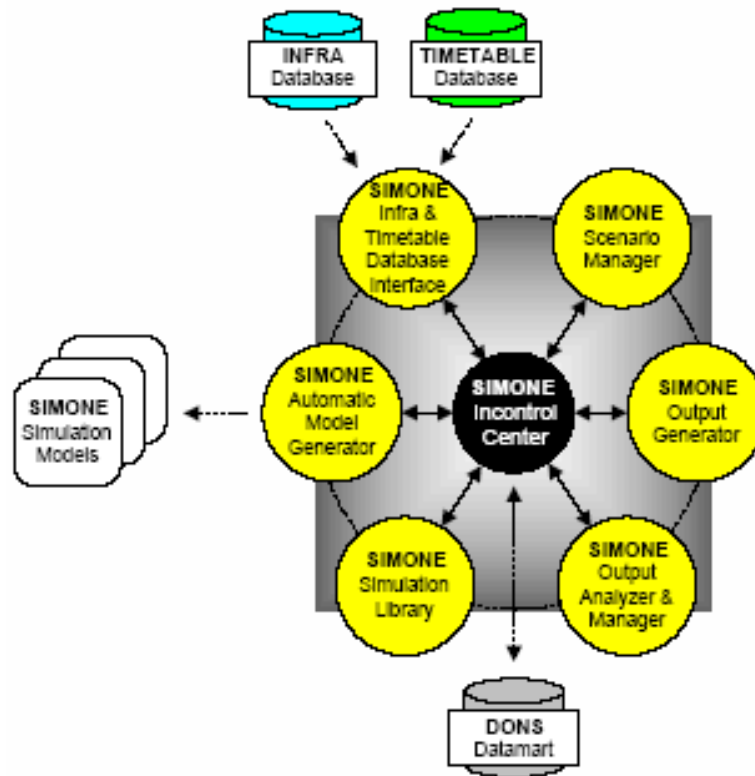
ancora. Attraverso questo modulo, pertanto, è possibile calcolare i tempi di occupazione di ciascun tronco infrastrutturale ed individuare eventuali colli di bottiglia. In questo modulo è presente anche un modello di materiale rotabile in cui è possibile assegnare caratteristiche molto simili a quelle dei modelli microscopici come ad esempio il tipo di unità di trazione installata a bordo, la massa del convoglio, il numero di carrozze, ecc. I dati di output del modulo Traffic sono utilizzati a loro volta dal modello di assegnazione.

- Il modulo *Valuation* fornisce come output diversi indici prestazionali di rete sia di carattere economico che meramente trasportistico (ritardi medi totali, capacità nei terminali, ecc.).

#### **4.2.2 Il modello SIMONE**

Il tool SIMONE è stato sviluppato dalla Dutch ProRail (Middelkoop & Bouwmann, Train network simulator for support of network wide planning of infrastructure and timetables, 2000). Questo simulatore nasce per verificare la robustezza del timetable di reti molto complesse ed estese, per verificare la stabilità di una rete e per indagare cause ed effetti dei ritardi.

Uno degli aspetti più vantaggiosi di questo tool consiste nella possibilità di importare i modelli di rete direttamente dai database in modo da generare quasi automaticamente il grafo della rete. La seguente figura mostra uno schema dell'architettura del simulatore SIMONE:



**Figura 124. Schema dell'architettura del tool SIMONE**

L'*Incontrol Center* costituisce il core dell'ambiente di simulazione ed è il modulo che realizza l'interazione tra tutti i moduli e, quindi, che ad essi si interfaccia. Un database Oracle consente di archiviare sia le configurazioni di setup di una specifica simulazione che i dati di output delle simulazioni stesse.

La *Simulation Library* è la raccolta di sei blocchi necessari alla simulazione in cui sono organizzati: le caratteristiche fisiche della rete (posizione delle stazioni e dei nodi di scambio, lunghezza e capacità dei tronchi inter stazione), le caratteristiche dei treni (tempi di percorrenza per ciascuna categoria, tipo di materiale rotabile), l'orario di esercizio (orari di partenza/arrivo in stazione, cadenzamenti).

L' *Infrastructure and Timetable Interface* è il modulo creato per interfacciare il tool SIMONE con il database delle ferrovie tedesche (*Dutch Railways*) cioè il cosiddetto DONS. Il tool, infatti, genera automaticamente dei modelli di simulazione a partire dai dati inerenti l'infrastruttura e l'orario di esercizio contenuti nel DONS.

Lo *Scenario Manager* costituisce l'interfaccia grafica utente (GUI); grazie ad esso è possibile visualizzare sia il grafo di rete che gli output della simulazione (ad esempio a seconda del tempo di percorrenza calcolato ciascun arco sarà colorato diversamente).



L'*Output Generator*, infine, è il modulo fornisce gli output della simulazione in vari formati (numerici e grafici). E' possibile estrapolare i dati di output per l'intera rete oppure definire una specifica area di analisi come, ad esempio, una stazione.

#### **4.3 I modelli di simulazione mesoscopici**

Un modello mesoscopico ha un livello di dettaglio di rappresentazione intermedio rispetto ai modelli macroscopici e microscopici. In tali modelli vi sono alcune componenti dell'infrastruttura che sono rappresentate con un livello di dettaglio microscopico (come ad esempio il sistema di segnalamento ed i piazzali di scambio) mentre altre ad un livello macroscopico (come ad esempio le stazioni).

Come i modelli macroscopici, anche quelli mesoscopici sono applicati per valutare gli effetti sia di interventi strategici che tattici.

Tuttavia, i modelli mesoscopici presentano il vantaggio di poter descrivere con maggior dettaglio (e quindi di compiere lo sforzo per la modellazione) solo gli aspetti che hanno una rilevanza significativa per la problematica investigata.

Ad oggi gli unici modelli mesoscopici sono stati sviluppati in ambito accademico quindi a scopo puramente di ricerca. Tra questi vi è la metodologia sviluppata da Marinov e Viegas (Marinov & Viegas, 2011) per l'analisi delle operazioni per il traffico delle merci.

#### **4.4 I modelli di simulazione microscopici**

Come già anticipato, un modello microscopico fornisce la rappresentazione della rete con il livello di dettaglio maggiore possibile. Infatti, nel modello di rete sono rappresentate tutte le principali caratteristiche dell'infrastruttura (velocità massime, pendenze, raggi di curvatura), quelle del segnalamento (segnali luminosi e sezioni di blocco) ed alcune informazioni relative all'organizzazione della circolazione (percorsi, itinerari, stazioni di scambio con coincidenze).

Se cambia anche uno solo dei valori di questi attributi è necessario introdurre un nuovo nodo per generare due diversi archi. Se il grafo è del tipo node-oriented gli attributi sono assegnati ai nodi, se invece il grafo è del tipo link-oriented agli archi.

Dal momento che tali modelli offrono il modello di rete che meglio approssima l'infrastruttura reale, sono la categoria di modelli indispensabile per il calcolo preciso dei tempi di percorrenza, per

la progettazione ed ottimizzazione dell'orario di esercizio e per l'individuazione e risoluzione dei punti di conflitto.

Uno dei vantaggi fondamentali del modello microscopico consiste nella possibilità di imporre come velocità massima consentita il minimo valore tra la cosiddetta velocità civile (*civil speed*), cioè la velocità massima consentita nel rispetto dei vincoli statici sulla linea, la velocità dinamica (*dynamic speed*) cioè la velocità massima consentita dal segnalamento e quella massima imposta al materiale rotabile cioè nel rispetto dei vincoli prestazionali del motore e della categoria di appartenenza (treno AV, treno a lunga percorrenza, ecc.). Tale vantaggio si comprende ancora meglio se si considera il fatto che in un'unica sezione di blocco tutte queste velocità, esclusa quella riferita al treno, possono non essere costanti.

La struttura gerarchica costituita da itinerari (intesi come successione di percorsi), percorsi (intesi come successione di sezioni di blocco) e sezioni di blocco (intese come successione di archi) consente di riprodurre le funzioni di smistamento realizzate dagli apparati di stazione (interlocking).

Questa struttura modulare consente, quindi, di trasferire nel modello di rete non solo requisiti tecnici (ad esempio un itinerario destinato ad un convoglio elettrico non può essere creato se non sono stati già creati degli archi con alimentazione elettrica), ma anche regole di dirigenza della circolazione.

Naturalmente, l'applicazione di un modello microscopico presuppone la conoscenza di tutte le caratteristiche delle componenti del sistema di trasporto quindi un significativo ammontare di dati di ingresso. Se da un lato la quantità di dati di ingresso è necessaria per avere una modellazione accurata del sistema, dall'altro causa un'inefficienza computazionale dei codici di calcolo che implementano tali modelli su reti ferroviarie molto complesse e/o estese o nel caso di analisi che richiedono un ingente numero di simulazioni come ad esempio analisi probabilistiche ed ottimizzazioni black-box).

L'esperienza ha confermato che, nonostante questi aspetti critici, i modelli microscopici sono gli unici in grado di fornire dati attendibili.

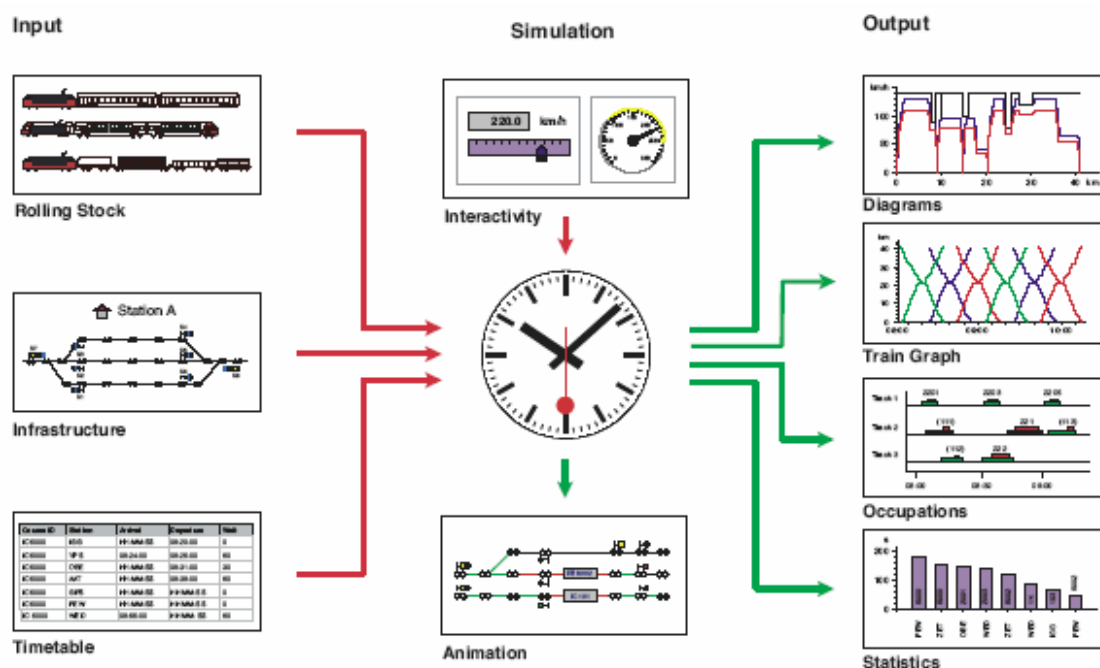
Sino ad oggi sono stati sviluppati numerosi software di simulazione microscopica sia per uso accademico che commerciale. I più utilizzati sono sicuramente i software *OpenTrack*<sup>®</sup> e *RailSys*<sup>®</sup>.

#### **4.4.1 Il software Open Track**

Il software di simulazione *OpenTrack*<sup>®</sup> è stato sviluppato da A. Nash e D. Huerlimann presso l'ETH di Zurigo (Nash & Huerlimann, 2004) per uso commerciale. Esso implementa un modello

microscopico, stocastico e ad avanzamento del tempo ad incrementi prefissati (modello “time-driven”). Inoltre, esso è un simulatore del tipo “multi-train” cioè che consente di simulare contemporaneamente più veicoli sull’infrastruttura.

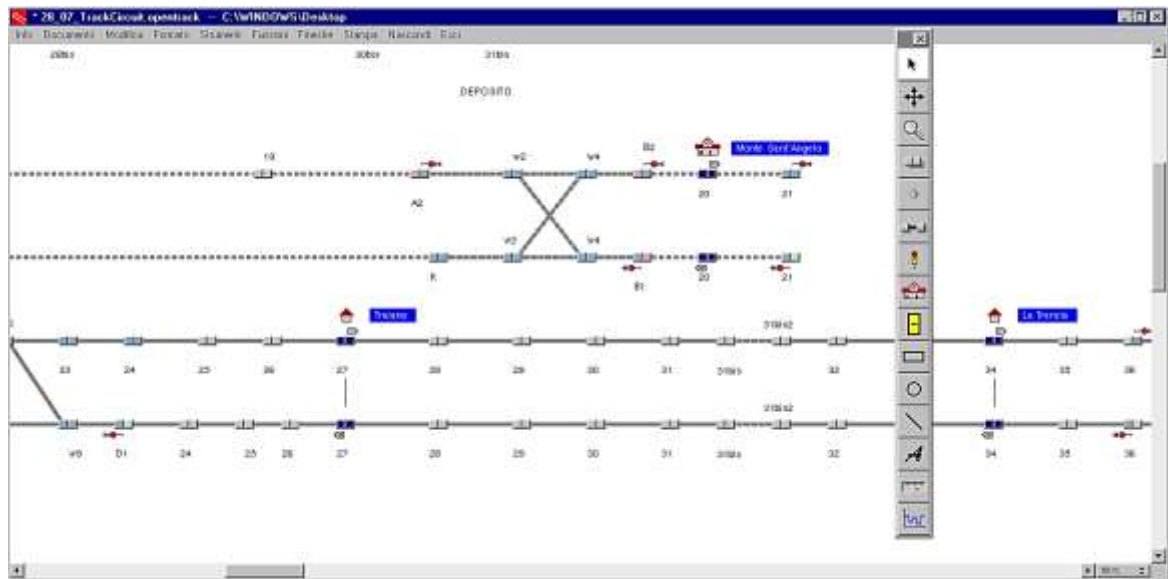
L’architettura del codice è basata su tre moduli distinti in base al tipo di dati in ingresso richiesti:



**Figura 125. Architettura del software OpenTrack (Nash, Huerlimann, 2004)**

Il modulo *Rolling Stock* gestisce tutti i dati relativi alle caratteristiche fisiche e prestazionali dei convogli. Uno specifico materiale rotabile è caratterizzato da una categoria di appartenenza (ad esempio Intercity, Regionale, Metropolitano, ecc), da caratteristiche fisiche (massa, lunghezza, numero di vagoni, ecc), da caratteristiche prestazionali (curva caratteristica meccanica, tipo di alimentazione del motore, ecc.). Attraverso le curve sforzo di trazione-velocità il modulo consente di calcolare anche il consumo di energia di trazione.

Il modulo *Infrastrucutre* gestisce la costruzione e visualizzazione del grafo della rete che è del tipo “link-oriented”. Tutte le caratteristiche geometriche del tracciato sono descritte come attributi di arco, mentre i nodi rappresentano stazioni, segnali luminosi, boe, deviatori ed altre componenti ancora. In questo modulo viene gestita anche la creazione e visualizzazione delle sezioni di blocco, dei percorsi e degli itinerari; per i nodi stazione è possibile anche specificare il tipo di apparato di stazione (interlocking) con i relativi tempi di attuazione delle condizioni di ciclo (manovra deviatori, formazione itinerario, ecc). E’ possibile definire anche diversi sistemi di segnalamento: dal multi-aspetto all’ETCS Livello 3. Nella seguente figura è mostrato il modello microscopico di rete:

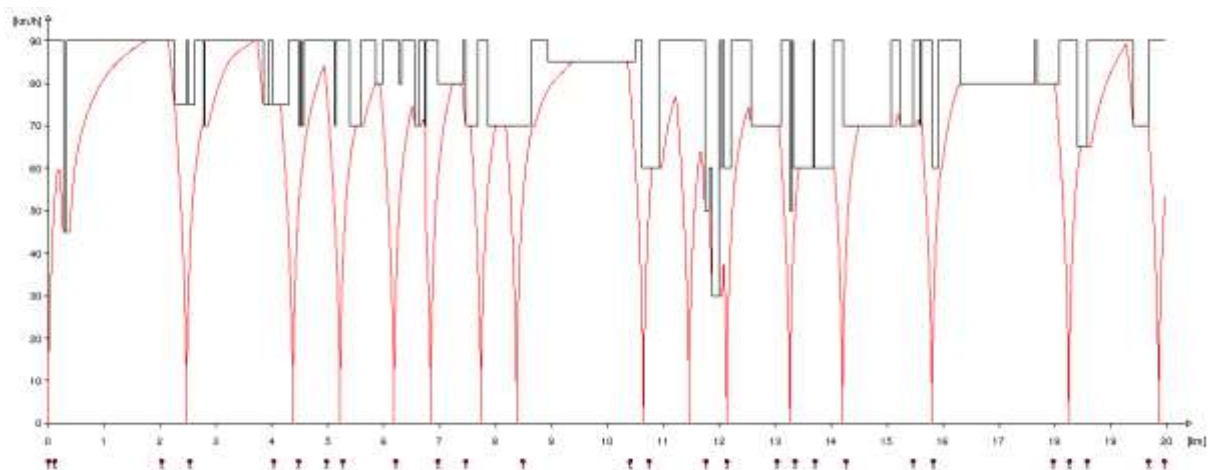


**Figura 126. Esempio del modello di rete nel software OpenTrack**

Il modulo *Timetable*, infine, riproduce l’orario di esercizio in termini di orario di partenza/arrivo per ciascuna stazione, tempi di servizio passeggeri, gestione coincidenze, ecc. In questo modulo è possibile trattare il tempo di sosta in stazione sia come una variabile deterministica che stocastica (assegnando il tipo di distribuzione che la descrive). In caso di tempo di sosta stocastico è possibile, inoltre, simulare disturbi stocastici. Tale modulo fornisce come output la percentuale dei treni che hanno maturato un ritardo pari o superiore ad un valore prefissato.

Dal momento che OpenTrack è un simulatore “time-driven”, per ogni step di calcolo sono determinate posizioni e velocità di tutti i veicoli presenti sulla rete attraverso un modello dinamico basato sull’integrazione della seconda legge di Newton, ed il moto dei veicoli è subordinato alla velocità massima consentita dal segnalamento e dai vincoli statici.

I dati di output del software sono sia in formato numerico che grafico e consistono in: diagrammi del moto (velocità ed accelerazione funzione dello spazio e del tempo), tempi di occupazione delle sezioni di blocco, statistiche sui ritardi (percentuale di treni ritardati in una certa stazione), diagrammi di consumo di energia di trazione (diagrammi tempo-potenza, spazio-energia elettrica/meccanica).



**Figura 127. Esempio di diagramma spazio-velocità fornito da OpenTrack**

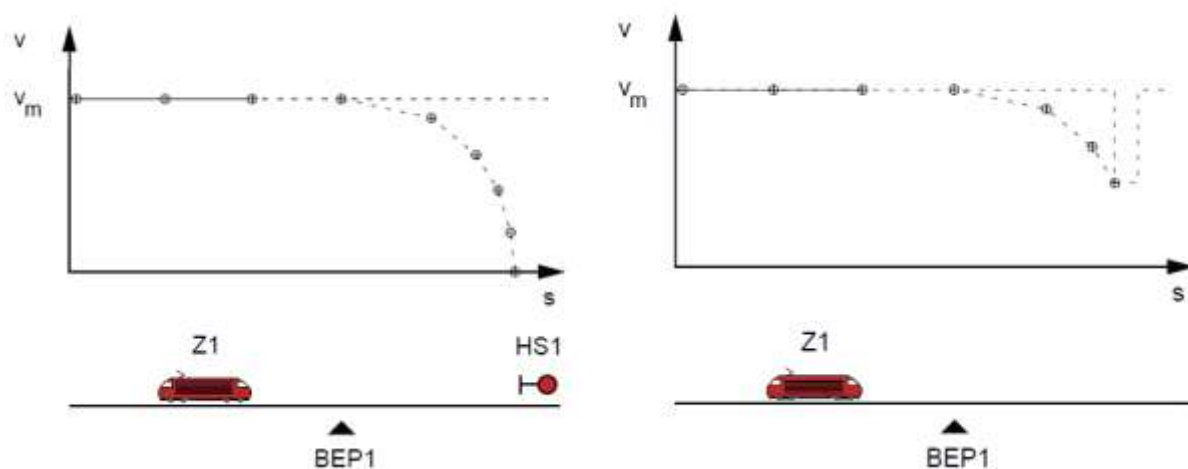
Il software consente di simulare sia il segnalamento con blocco fisso che con blocco mobile assoluto.

In caso di blocco fisso, per la modellizzazione del comportamento in frenata, OpenTrack utilizza un modello analitico semplificato. Tale modello prevede come dati di input il diagramma velocità-sforzo frenante e la forza di aderenza (definita come percentuale del peso totale del veicolo e costante per uno specifico scenario di simulazione) ed, applicando la seconda legge di Newton e la condizione al limite di aderenza, fornisce come output un profilo di decelerazione a scalino del tipo:

$V_{in}$ [km/h]	$V_{fin}$ [km/h]	$d$ [ $m/s^2$ ]
$V_{max,treno}$	100	-0,4
100	40	-0,5
40	0	-0,6

Tale modello di decelerazione viene utilizzato per definire il punto di inizio frenatura (indicato nella seguente figura come BEP1): il calcolo viene eseguito a ritroso (*backward*) cioè a partire dal punto target (segnale rosso o punto con velocità inferiore) e dalla velocità target applicando la decelerazione del modello prima descritto e fino al raggiungimento della velocità corrente del veicolo. La curva di frenatura è una spezzata calcolata con un modello analitico considerando la decelerazione costante a tratti.

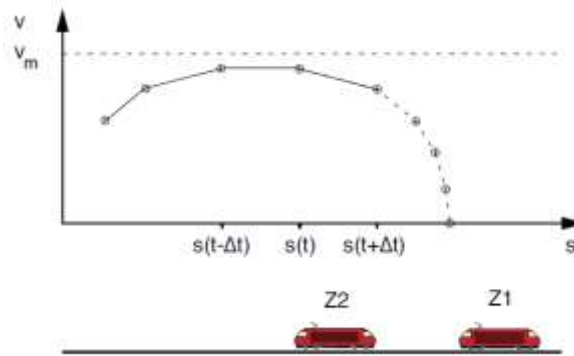
Ottenuto il punto di inizio frenatura, il veicolo avanza a velocità costante fino a tale punto per poi seguire il profilo di decelerazione precalcolato. Nella seguente figura viene mostrato il profilo di decelerazione precalcolato per l'approccio al segnale rosso HS1 (a sinistra) e per la restrizione di velocità (a destra):



**Figura 128. Applicazione frenatura con blocco fisso (Huerlimann, Mastella, OpenTrack versione 1.4)**

I punti contrassegnati sui profili rappresentano i valori ottenuti per ogni step di calcolo. Quando il veicolo ha raggiunto la velocità obiettivo o se il rallentamento non è più necessario la manovra di arresto in corso viene annullata ed il veicolo acquisisce la velocità obiettivo ed il punto obiettivo aggiornati in funzione dello stato del sistema di segnalamento.

In caso, invece, di distanziamento con blocco mobile, il software consente la simulazione solo con l’approccio “hard wall”: nel generico istante  $t$  di simulazione il modello di frenatura calcola la curva di arresto a ritroso a partire dalla posizione della coda del veicolo leader (nella seguente figura indicato come Z1 e considerato fermo nel generico istante  $t$  di calcolo) e verifica che la velocità attuata nell’istante di simulazione successivo  $(t+\Delta t)$ , considerando sia di accelerare che di andare a velocità costante, gli consenta l’arresto in sicurezza. Se ciò non è garantito il modello applica la frenatura cioè all’istante  $(t+\Delta t)$  la velocità del veicolo sarà quella della curva di frenatura precalcolata. Ad ogni step di simulazione, il sistema verifica se la velocità del treno Z2 può essere aumentata: ciò accade solo se durante lo step di simulazione  $\Delta t$  il veicolo leader ha percorso uno spazio tale da consentire l’arresto in sicurezza del follower a partire da una velocità iniziale maggiore di quella corrente:

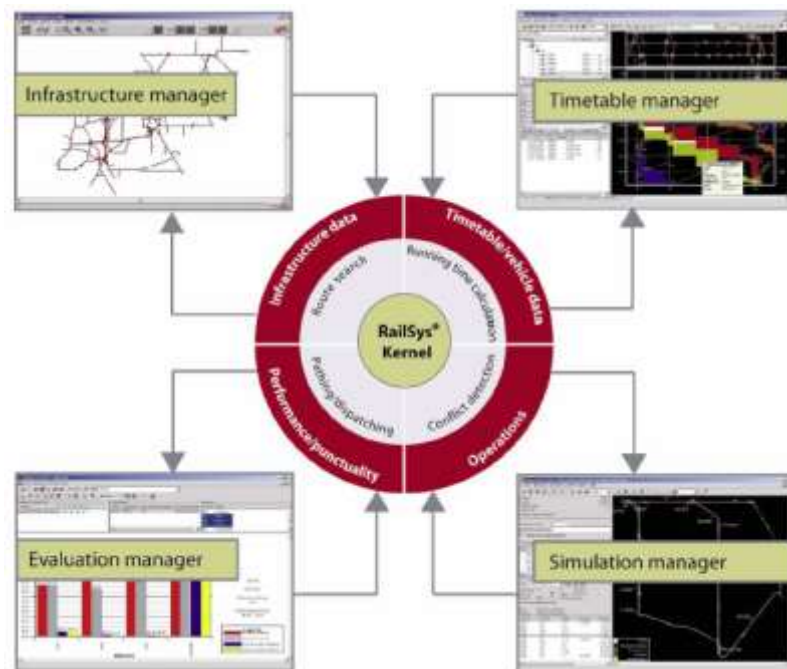


**Figura 129. Applicazione frenatura con blocco mobile assoluto (Huerlimann, Mastella, OpenTrack versione 1.4)**

#### 4.4.2 Il software RailSys

Il software *RailSys*<sup>®</sup> è un software commerciale di tipo microscopico ed ad avanzamento del tempo a step prefissati (time driven). E' stato ideato presso la Leibnitz Universitat of Hannover e, successivamente, sviluppato in collaborazione con la Rail Management Consultants (Siefer & Radtke, 2005). Il software trova applicazione nella progettazione e verifica dell'orario di esercizio ferroviario.

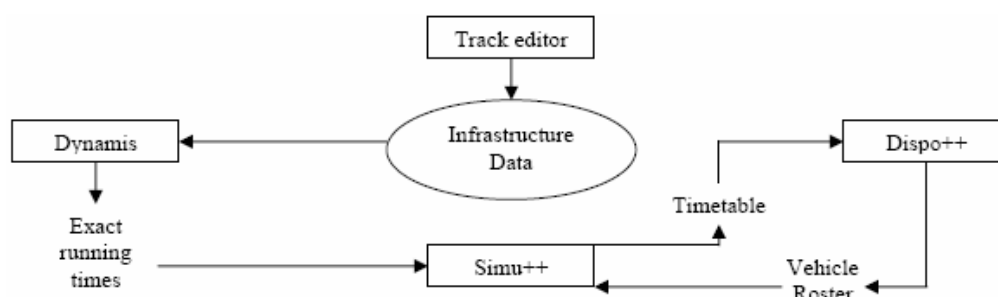
Anche tale software ha una struttura modulare ed utilizza un modello di rete a grafo del tipo "link-oriented". In particolare, il software si articola in quattro moduli:



**Figura 130. Schema dell'architettura modulare del software RailSys**

L' *Infrastructure manager* è il modulo attraverso il quale sono inseriti e gestiti tutti i dati inerenti l'infrastruttura. I dati di input gestiti da tale modulo sono quelli tipici dei modelli microscopici (pendenze, raggi di curvatura, velocità massime, tipo di segnalamento, lunghezza sezioni di blocco, ecc).

Il modulo *Timetable manager* gestisce tutti i dati relativi all'orario di esercizio (tempi di sosta, orario di arrivo/partenza stazioni, ecc.). E' possibile, inoltre, definire tali parametri di simulazione anche come variabili aleatorie con distribuzione di probabilità predefinita al fine di simulare l'occorrenza di disturbi stocastici all'esercizio. Essendo un software di progettazione, RailSys consente anche di progettare, attraverso il *Timetable manager*, un orario di esercizio privo di ritardi cioè senza conflittualità; tale progettazione è articolata in tre fasi. La prima fase prevede una simulazione deterministica per calcolare i tempi di percorrenza minimi sulle tratte della rete. Nella seconda fase un sotto modulo (definito DYNAMIS) applica un modello dinamico per simulare la marcia dei veicoli e dei tempi di percorrenza corretti. La terza ed ultima fase consiste nella costruzione dell'orario di esercizio: un sotto modulo chiamato Simu++ utilizza i tempi di percorrenza corretti per trovare e risolvere i punti di conflitto dovuti all'allocatione di sezione di blocco da parte di più convogli simultaneamente e fornire come output il timetable. Nella seguente figura è mostrato uno schema della procedura di calcolo del timetable:

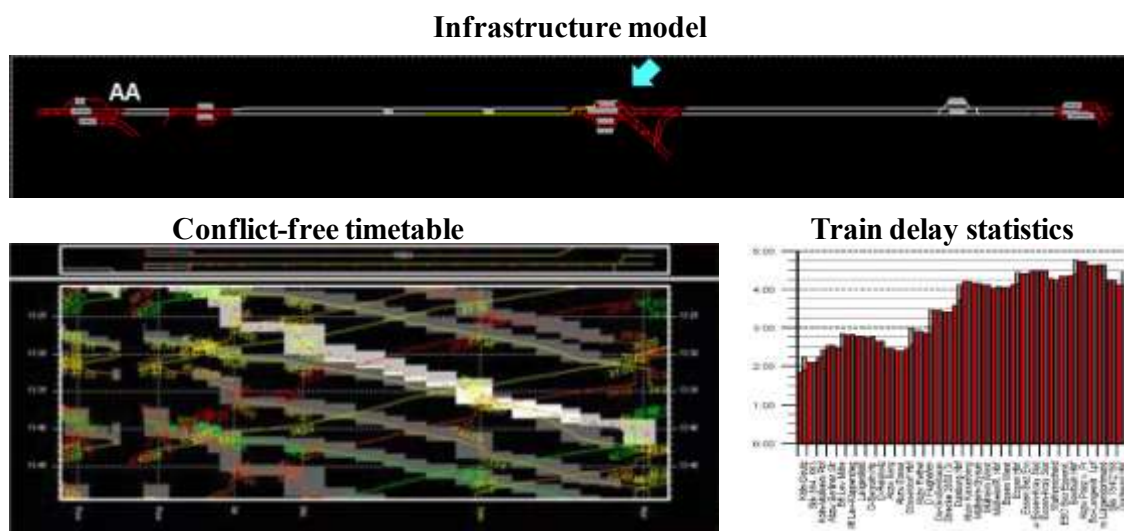


**Figura 131. Schema della procedura di definizione del timetable in RailSys (Bendfeldt et al., 2000)**

Il modulo *Simulation Manager* gestisce tutti i dati di input relativi al materiale rotabile (massa, lunghezza, numero di veicoli, curva sforzo frenante-velocità, ecc.). Attraverso questo modulo è possibile, inoltre, svolgere una progettazione robusta del timetable: dopo avere definito un timetable privo di punti di conflitto (con il *Timetable manager*) si possono svolgere simulazioni stocastiche introducendo i ritardi come variabili aleatorie al fine di analizzare gli effetti dei disturbi sulle prestazioni della rete ferroviaria.



Il modulo *Evaluation Manager* , infine, ha la funzione di elaborare i dati di outout delle simulazioni; grazie ad esso si ottengono diagrammi del moto tempo-velocità, tempi di occupazione delle sezioni di blocco, traiettorie dei veicoli, ritardi alle stazioni, numero di treni ritardati, ecc.



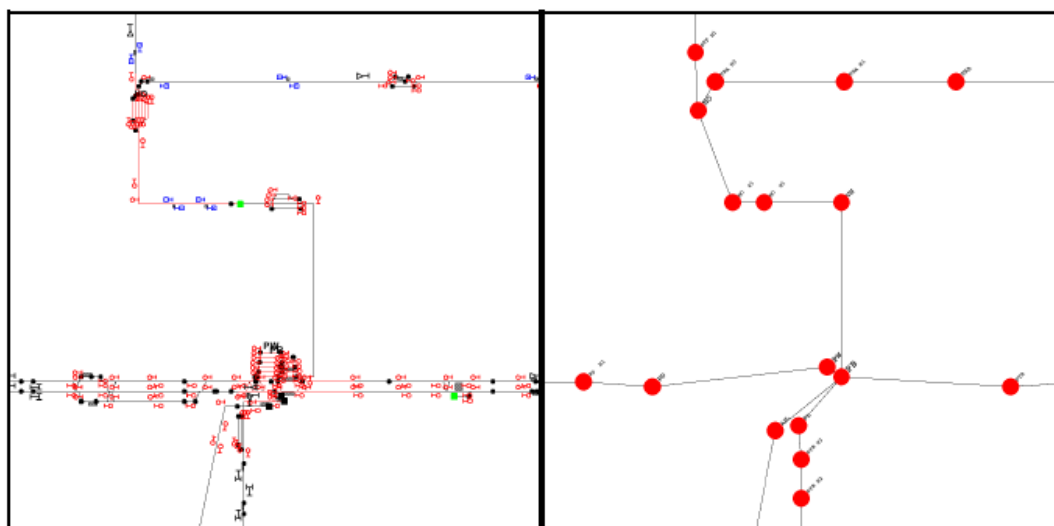
**Figura 132.** Alcune interfacce grafiche utente (GUI) del software RailSys

#### 4.5 I modelli di simulazione ibridi

Dal momento che sia i modelli macroscopici che quelli microscopici presentano dei vantaggi e degli svantaggi, sono state sviluppati alcuni modelli che forniscono l'accuratezza di calcolo di quelli microscopici e l'efficienza computazionale di quelli macroscopici. Per tale ragione questi modelli sono definiti "ibridi" anche se in letteratura si trovano pochi esempi.

Più che veri e propri software, si tratta di applicazioni di interfaccia come ad esempio quella sviluppato dall'Università di Hannover in collaborazione con la RMCon e l'Austriab Federal Railways *ÖBB* che consiste in un'interfaccia che consente il flusso di scambio dati tra il software macroscopico NEMO e quello microscopico RailSys (Kettner, Sewcyk, & Eickmann, 2003). Questa integrazione ha reso possibile l'associazione tra il modello macroscopico di rete dell'Austrian Railways (realizzato in NEMO) con le prestazioni di rete (tempi di percorrenza, minimi headways) calcolate attraverso simulazione in ambiente microscopico (RailSys). Infatti, utilizzando i dati di output di RailSys e la domanda di trasporto prevista a lungo termine, NEMO stima i flussi di traffico per ciascuna tratta delle rete ed individua i colli di bottiglia.

In particolare, una procedura automatizzata converte gli elementi infrastrutturali del modello di rete microscopico (intersezioni, stazioni, terminali di scambio) in nodi del grafo macroscopico, mentre le tratte inter stazione sono convertite in archi.



**Figura 133. Conversione automatica del modello di rete microscopico di RailSys nel modello macroscopico di NEMO (Kettner et al., 2003)**

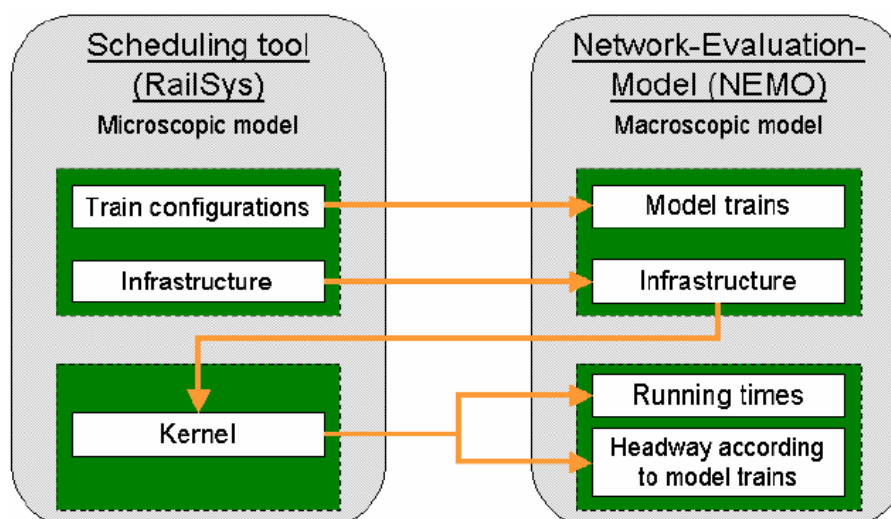
In seguito a questa conversione dell'infrastruttura, sono generati dei modelli di veicolo e sono calcolati i tempi di percorrenza ed i minimi headways.

L'interfaccia tra RailSys e NEMO si basa su un funzionamento in cui il modello microscopico funziona come applicazione server in remoto mentre il modello macroscopico accede ai dati del server come un client.

Infatti, NEMO per acquisire i dati necessari deve inoltrare una richiesta al server RailSys in cui deve specificare il tipo di treno ed il percorso per i quali richiede i tempi di percorrenza. I modelli di veicolo sono preliminarmente generati in base alle diverse categorie specificate nel modello di veicolo in RailSys. Ricevuta tale richiesta, RailSys calcola quattro diversi valori del tempo di percorrenza: 1. senza considerare soste né alla stazione di partenza né alla stazione di arrivo; 2. considerando la sosta solo nella stazione di partenza; 3. considerando la sosta nella stazione di arrivo; 4. considerando la sosta in entrambe le stazioni.

A sua volta NEMO individua le tratte con punti di conflitto (i veicoli non possono né transitare né sorpassare) e le invia al server insieme ai modelli dei veicoli ed ai percorsi. Con questi dati RailSys calcola il minimo headway per ciascuna delle seguenti combinazioni: I) treno 1 e 2 circolanti nella stesso verso  $A \rightarrow B$ , II) treno 1 e 2 circolanti nella stessa direzione  $B \rightarrow A$ ; III) treni circolanti in versi opposti (1 da A verso B e 2 da B verso A); IV) treni circolanti in versi opposti (1 da B verso A e 2 da A verso B).

Dunque, il modello ibrido NEMO-RailSys consente non solo di superare i limiti della simulazione macroscopica e della microscopica, ma di calcolare anche le prestazioni di rete e le potenzialità.



**Figura 134. Interfaccia tra RailSys (server) e NEMO (client). (Kettner et al., 2003)**

#### 4.6 I modelli di simulazione sincroni ed asincroni

I modelli di simulazione sincroni sono dei modelli ad eventi discreti con avanzamento del tempo ad intervalli prefissati in cui lo stato di tutti gli elementi è aggiornato ad ogni step di simulazione e rispettando l'ordine degli eventi come se accadessero nella realtà.

Pertanto, il periodo di simulazione viene discretizzato in intervalli di tempo la cui ampiezza è stabilita in funzione di quella del periodo di simulazione. Tali intervalli sono definiti *step di simulazione*.

Nel caso della simulazione del traffico ferroviario ciò equivale a dire che, per ogni step di simulazione, è aggiornato sia lo stato di ciascun veicolo presente sulla linea, perché previsto da orario di esercizio, cioè sono calcolate le grandezze cinematiche spazio, velocità ed accelerazione, sia lo stato degli enti manovrabili (deviatori, sbarre dei passaggi a livello, ecc.), che l'aspetto dei segnali luminosi.

Un tale approccio consente, quindi, di conoscere per ogni step di simulazione lo stato di ogni componente del sistema ferroviario e di poter studiare l'interazione con le altre; si pensi, ad esempio, a come il moto di un veicolo follower sia condizionato da quello del veicolo leader.

Ad ogni step di simulazione deve essere aggiornata la configurazione dell'intero sistema introducendo, eventualmente, dei ritardi.

Inoltre, lo stato delle componenti ad un certo istante di simulazione è calcolato considerando lo stato all'istante di simulazione precedente. Ad esempio, per aggiornare lo stato cinematico dei veicoli è possibile procedere con successive integrazioni come descritto nel capitolo 1.

Mentre lo stato degli elementi infrastrutturali e tecnologici (come segnali, deviatori, apparati di stazione) viene aggiornato seguendo l'ordine reale di occorrenza degli eventi.

Esempi di codici di calcolo che si basano su modelli di simulazione sincroni sono OpentTrack e RailSys.

Nei modelli di simulazione asincroni, invece, l'ordine con cui è aggiornato lo stato delle componenti del sistema simulato non è quello dell'occorrenza nel sistema reale, ma segue altri criteri stabiliti a priori. Nel caso della simulazione del traffico ferroviario tali modelli adottano come criterio per ordinare gli eventi da processare quello dettato dall'orario di esercizio e dalla categoria dei treni (AV, regionali, a lunga percorrenza). Infatti, conoscendo uno specifico orario di esercizio, i tempi di percorrenza di ciascun treno e la configurazione del sistema di segnalamento (forniti come dati di input), la logica di simulazione prevede che i primi treni ad essere processati siano quelli con l'orario di partenza minore e la categoria di appartenenza superiore. Con tale logica accade, tuttavia, che il tempo di percorrenza dei treni che hanno priorità assoluta sugli altri (ad esempio i treni AV) siano condizionati solo dai disturbi endogeni cioè dovuti alle caratteristiche del proprio moto (ad esempio guasti o mal funzionamenti del veicolo) e da disturbi in ambito in stazione (ad esempio tempi di attesa maggiori di quelli schedulati). Ciò significa che l'eventuale disturbo indotto dalla circolazione promiscua con treni di categoria inferiore non può essere modellato.

Inoltre, la simulazione asincrona comporta che i treni con priorità bassa (ad esempio i treni merci) possano disporre solo di una capacità di rete residua: infatti, siccome i primi treni ad essere processati sono quelli con alta priorità i treni di categoria inferiore avranno disponibile l'infrastruttura solo per i tempi liberi residui.

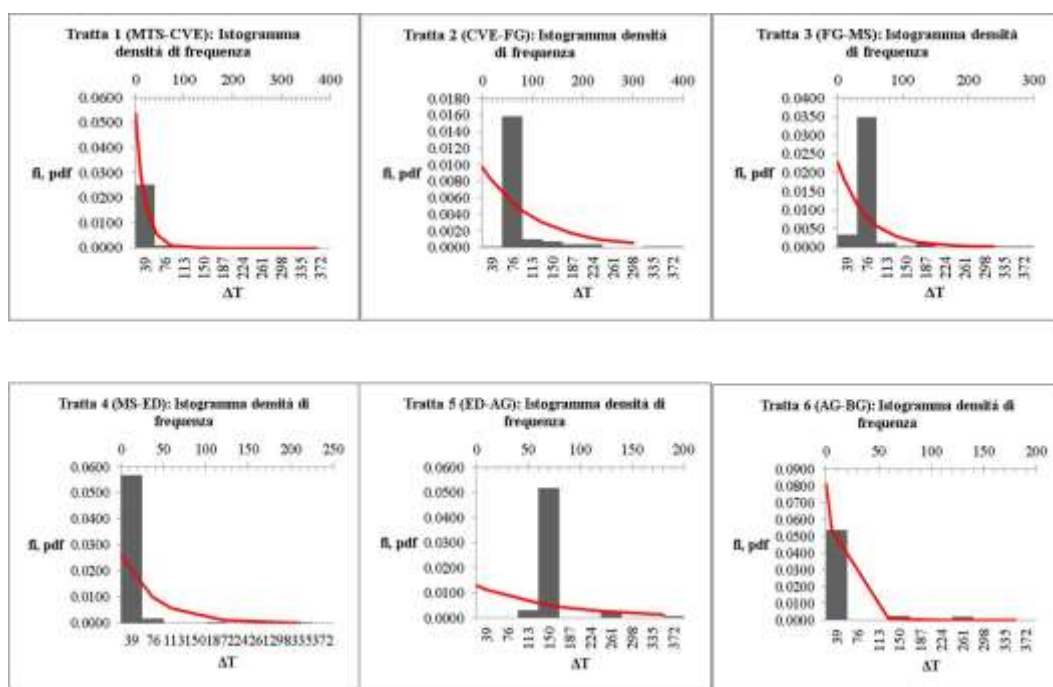
A causa di tali peculiarità, i modelli di simulazione asincroni possono essere utilizzati solo come strumenti per progettare orari di esercizio privi di punti di conflitto. Infatti, la logica con cui è stabilito l'ordine di simulazione degli eventi rispecchia proprio le fasi di progettazione dell'orario di esercizio.

Tuttavia, se la logica con cui è resa disponibile nel tempo e nello spazio l'infrastruttura è, per così dire, strettamente gerarchica si riscontra inevitabilmente che, in simulazione, i ritardi dei treni con bassa priorità saranno maggiori rispetto a quelli reali.

#### 4.7 I modelli di simulazione deterministici e stocastici

Si definisce modello deterministico un modello in cui  $\tau_i$ , l'istante di occorrenza dell'evento  $e_i$ , è considerato come una costante durante la simulazione. Se, invece, tale istante è una variabile aleatoria avente una certa distribuzione di probabilità la simulazione è definita stocastica.

Nell'ambito delle applicazioni dell'esercizio ferroviario le variabili che interessa maggiormente trattare come aleatorie sono i tempi di sosta in stazione ed i tempi di percorrenza. La seguente figura mostra come in realtà i tempi di percorrenza di una tratta non solo hanno un valore aleatorio (sono distribuiti secondo un modello esponenziale negativo), ma anche che i modelli di distribuzione sono definiti da parametri diversi:



**Figura 135. Esempi di distribuzioni di probabilità dei tempi di percorrenza di alcune tratte della linea Cumana (EAV)**

Naturalmente, se la simulazione è deterministica tali variabili avranno un valore costante e pari al valore atteso. In tal caso i valori saranno quelli definiti nell'orario di esercizio. Un modello deterministico, infatti, viene in genere applicato per la progettazione preliminare dell'orario oppure per la verifica delle prestazioni della rete con le operazioni schedate.

Invece, i modelli stocastici sono utilizzati per la stima della robustezza di un orario di esercizio riguardo ai disturbi, per la verifica della stabilità di una rete e per simulare il moto dei veicoli con guida driverless.

Generalmente, i modelli stocastici sono anche del tipo microscopico e considerano come variabili aleatorie i tempi di sosta in stazione. In letteratura si trovano numerosi studi su reti reali finalizzati alla definizione di modelli di distribuzione di probabilità; ad esempio, è oramai accertato che i modelli che meglio descrivono tale variabile sono quello log-normale, in caso di linee metropolitane e di Weibull (Yuan, 2006) in caso di treni a lunga percorrenza (Martinez, Vitoriano, Fernandez, & Cucala, 2007).

#### **4.8 La simulazione nella pianificazione e gestione dei sistemi ferroviari**

Come accade nei diversi settori scientifici anche nell'ingegneria dei trasporti lo studio di un sistema complesso come quello del trasporto ferroviario si basa sulla costruzione di modelli simulativi ad hoc. Il modello simulativo deve riprodurre al meglio il comportamento del sistema reale e costituisce un validissimo strumento di supporto ai tecnici del settore per misurare le prestazioni del sistema stesso al variare delle sue caratteristiche fisiche e/o funzionali, per valutare i diversi comportamenti del sistema in fase di progetto al variare delle condizioni operative, in sostanza per compiere una scelta conoscendone preventivamente gli effetti per quanto possibile.

Il sistema di trasporto ferroviario è complesso per sua natura: le diverse componenti (infrastruttura, materiale rotabile, orario di esercizio) interagiscono tra loro rendendo impossibile la definizione e la risoluzione di un modello analitico che possa fornire in maniera esplicita le prestazioni di rete.

Per tali ragioni sono stati sviluppati nel tempo numerosi codici di simulazione basati sulle varie categorie di modelli descritti nella prima parte del presente capitolo. La risoluzione dei modelli attraverso la simulazione consente di:

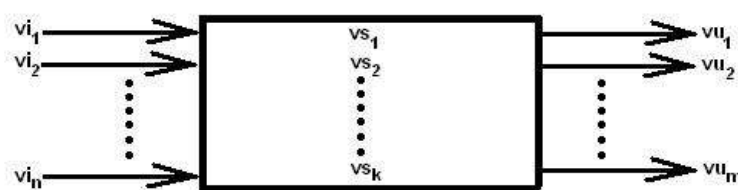
- analizzare le interazioni tra le singole componenti che costituiscono il sistema reale;
- valutare l'impatto di una modifica al sistema prima di realizzarla al fine di giudicare l'efficienza e l'efficacia in termini assoluti o relative a quelle di altre soluzioni;
- valutare le prestazioni di un sistema, che all'atto pratico è ancora in fase progettuale, nelle diverse condizioni di funzionamento cioè analizzare il suo comportamento in diverse condizioni possibili nella realtà;
- validare i risultati ottenuti con modelli analitici di nuovo sviluppo.

Un "sistema" è in genere definito come un ente fisico costituito da diverse componenti tra loro interagenti che risponde alla sollecitazione esercitata da una certa azione producendo una reazione. Questa definizione è valida a prescindere dal campo scientifico in cui il concetto di sistema viene adottato.

Inoltre, un sistema è caratterizzato da variabili fisiche che dipendono dal tempo e che sono distinte in:

- variabili di input o variabili di ingresso cioè esterne al sistema ed il cui andamento nel tempo è indipendente dal sistema stesso;
- variabili di output o variabili di uscita cioè grandezze il cui andamento nel tempo dipende almeno in parte dal sistema e dalle cause esterne.

Il sistema, dunque, trasforma il vettore delle grandezze in ingresso  $v_i(t) \in \mathbb{R}^n$  in un determinato vettore delle grandezze in uscita  $v_u(t) \in \mathbb{R}^m$  :



**Figura 136. Variabili di ingresso e di uscita di un sistema**

Il vettore delle variabili di uscita dipende non solo dal vettore delle variabili in ingresso in un certo istante, ma anche dalla storia del sistema fino a questo istante di tempo cioè dall'evoluzione temporale che ha subito il sistema in un certo periodo di riferimento.

Pertanto, per esprimere una relazione di dipendenza tra il vettore  $v_u$  ed il vettore  $v_i$  che tenga conto sia della condizione attuale del sistema che di quelle passate, si definisce un terzo vettore  $v_s(t) \in \mathbb{R}^k$  cioè lo *stato del sistema* che contiene l'informazione necessaria per determinare univocamente il vettore  $v_u$  per ogni istante  $t' \geq t$ , noto che sia anche il vettore  $v_i$ . Le componenti del vettore di stato del sistema sono definite *variabili di stato*  $v_s(t) = [v_{s1}(t), v_{s2}(t), \dots, v_{sk}(t)]$ .

Quindi, avendo definito sia le variabili di ingresso che le variabili di stato è possibile esprimere la relazione di dipendenza delle variabili di output dalle variabili di input cioè formulare le relazioni matematiche che descrivono il comportamento del sistema nel tempo cioè la cosiddetta *dinamica* del sistema. Tali relazioni sono definite *equazioni di stato del sistema*.

Nel caso di una rete ferroviaria il sistema è del tipo *ibrido* in quanto coesistono componenti il cui stato è ad avanzamento temporale e componenti il cui stato è ad eventi discreti.

Le *componenti ad avanzamento temporale* hanno un comportamento descritto da funzioni continue nel tempo, generalmente equazioni differenziali rispetto alla variabile tempo.

Le *componenti ad eventi discreti*, invece, hanno un comportamento nel tempo descritto da un sistema di equazioni nella variabile tempo concatenate cioè ciascuna dipendente dallo stato del sistema nell'istante precedente.

La categoria dei sistemi ibridi è quella più generale e complessa che possa esistere come analogamente le reti stradali e quelle ferroviarie sono due dei sistemi più articolati e complessi esistenti nella realtà.

Un *modello*, invece, è un sistema di equazioni che consente di riprodurre il comportamento del sistema al variare del tempo e le interazioni tra le sue componenti.

Il sistema di trasporto ferroviario è un sistema ibrido costituito da due sottosistemi interagenti tra loro cioè sottosistema della Domanda, o più semplicemente Domanda, e sottosistema dell'Offerta, o più semplicemente Offerta.

La *Domanda* assume due definizioni diverse a seconda se valutata dal gestore dell'Infrastruttura (la cosiddetta *Track Authority*) o dal gestore del Trasporto (la cosiddetta *Train Operating Company* - TOC).

Infatti, la *Track Authority* ha il compito di gestire gli accessi e gli utilizzi delle diverse tratte ferroviarie effettuati dalle differenti TOC che agiscono sulla rete, applicando una tariffa di utilizzo a seconda del tipo e delle caratteristiche delle tratte adoperate. In questo caso, allora, la domanda è costituita, in pratica, dal cosiddetto *timetable* cioè dall'orario di servizio elaborato dal gestore dell'infrastruttura. Infatti, la *Track Authority* ha il compito di gestire ed organizzare i treni richiesti dalle diverse TOC, realizzando un *timetable* che programmi le varie corse sui vari tracciati, in modo tale da escludere l'instaurarsi di possibili conflitti e garantire il raggiungimento dei massimi livelli di sicurezza e qualità durante le operazioni di circolazione. Pertanto, per la *Track Authority* la domanda è costituita dal *timetable* operativo delle corse dei treni richiesti.

Per progettare il *timetable* operativo di una rete ferroviaria è assolutamente necessario conoscere nel dettaglio sia le caratteristiche delle tratte che ciascun treno deve percorrere (lunghezza, pendenza, limiti di velocità, raggi di curvatura, sistema di segnalamento, progressive delle stazioni, ecc.) che le caratteristiche fisico-prestazionali di ciascun convoglio considerato quali, ad esempio, la velocità massima, l'accelerazione massima, il peso, il numero di vagoni, la classe di priorità (ad esempio se è un treno AV, Eurostar, Regionale, etc.) e così via.

Dunque è intuitivo comprendere che, per poter progettare adeguatamente un *timetable* operativo delle corse richieste, è "obbligatorio" disporre di una rappresentazione microscopica del sistema, la quale descriva nel dettaglio le caratteristiche e le prestazioni di ciascuna delle sue componenti.

Dal punto di vista delle *Train Operating Companies*, invece, la domanda da soddisfare è costituita dal flusso di passeggeri o di merci da trasportare da un luogo all'altro della rete. Per determinare il numero di corse da effettuare o la frequenza dei treni o ancora le tratte da percorrere, quindi, le varie TOC dovranno realizzare un'analisi della domanda analoga a quella realizzata nel campo del trasporto stradale e cioè determinare le matrici O/D per i passeggeri e/o per le merci relative a determinate fasce orarie. In questo caso ovviamente i centroidi di origine e destinazione da



considerare coincideranno con le stazioni ed i nodi terminali esistenti sulla rete ferroviaria considerata.

Le TOC operano il vero e proprio servizio di trasporto sia dei passeggeri che delle merci, applicando una tariffa per i passeggeri o un costo per l'espletamento del servizio per gli spedizionieri.

L'*Offerta*, invece, è costituita dai tracciati ferroviari, dai sistemi di segnalamento, dalle stazioni, dalle sottostazioni di alimentazione e da tutte le loro componenti.

Dopo avere definito il sottosistema della Domanda (matrice O/D) e quello dell'Offerta (grafo della rete), il passo successivo per poter applicare un modello di simulazione consiste nell'assegnazione della domanda alla rete.

In ambito ferroviario l'assegnazione della domanda alla rete consiste nell'attribuire a ciascun elemento della domanda, cioè a ciascuna corsa di treno dell'orario di servizio, il rispettivo percorso sulla rete ferroviaria considerata. Questi percorsi sono assegnati a priori dalla TOC a seconda delle esigenze operative, per cui non è assolutamente necessario implementare un modello di scelta del percorso stocastico come, invece, è necessario per il trasporto stradale.

Il percorso di ciascuna corsa di treno richiesta dalle TOC alla Track Authority è, infatti, uno dei dati fondamentali che obbligatoriamente devono essere forniti a priori per consentire a quest'ultimo ente di elaborare un timetable operativo della circolazione. L'assegnazione dei treni ai percorsi, dunque, è in questo caso un processo deterministico realizzato a priori, per cui è uno dei dati di input fondamentali per il processo di costruzione del timetable.

Come già sottolineato precedentemente, l'elevato grado di complessità dei sistemi dinamici ibridi con cui si rappresentano i sistemi di trasporto come quello ferroviario rende il problema dello studio del loro comportamento impossibile da risolvere in modo analitico ed è necessario, quindi, ricorrere a procedure di simulazione di modelli per valutare numericamente le principali grandezze del sistema, le misure di prestazione e le relative evoluzioni.

Per comprendere l'importanza dell'approccio simulativo si pensi che in passato gli studiosi dei sistemi ferroviari realizzavano appositi modellini in scala 1:76 del sistema da studiare per poterne cogliere gli aspetti critici e poter valutare gli effetti delle diverse alternative di progetto.

L'avvento dei moderni calcolatori elettronici e lo sviluppo notevole delle capacità computazionali ha consentito il diffondersi dei metodi di simulazione virtuale che risultano molto più flessibili, veloci, economici ed accurati dei modelli in scala usati in passato.

I vantaggi principali derivanti dall'utilizzo di tali tecniche nel campo ferroviario sono:

- risparmio economico, derivante dal fatto che non vi è il bisogno di realizzare modelli in scala reale o prototipi dell'infrastruttura;

- analisi delle prestazioni: attraverso la simulazione virtuale, infatti, è possibile ricavare il valore delle principali variabili di prestazione del sistema e, quindi, in tal senso determinare le interazioni tra i diversi convogli presenti sulla rete in studio nonché le interazioni di tali convogli con l'infrastruttura stessa. Inoltre, è possibile riprodurre, quante volte si ritenga necessario, l'accadimento di un evento che nel sistema reale accadrebbe solo raramente, ma che è capace di generare disturbi e conflitti nelle operazioni di traffico.
- valutare gli effetti prodotti da diverse alternative progettuali che riguardano interventi di tipo strettamente strutturale, tecnologico o di tipo operativo cioè di gestione della circolazione.
- verificare il timetable. Mediante la simulazione virtuale, infatti, è possibile verificare la stabilità e l'efficacia di un ben determinato timetable senza metterlo in opera nel sistema reale e, quindi, evitare inutili disturbi al traffico ferroviario.
- controllare e verificare il funzionamento di timetables di progetto ciò è realizzato attraverso la simulazione di disturbi stocastici applicati alla durata della marcia ed agli istanti di inizio/fine degli eventi schedulati dal timetable, quali gli arrivi o le partenze dei treni a/da ciascuna stazione del sistema considerato.

La simulazione delle reti ferroviarie oggi è largamente impiegata in tutta una serie di applicazioni pratiche strettamente connesse alle attività di supporto alle decisioni nelle fasi di pianificazione e progettazione sia dell'infrastruttura che delle strategie di operazione e gestione della circolazione.

In generale, nel settore dei trasporti si distinguono tre dimensioni temporali su cui viene effettuata l'attività di pianificazione:

- la Pianificazione strategica detta anche "a lungo termine";
- la Pianificazione di medio periodo;
- la Pianificazione tattica detta anche "a breve termine".

La *pianificazione strategica* prevede interventi sul sistema di trasporto che richiedono lunghi tempi di realizzazione ed ingenti costi di realizzazione. Tali interventi fanno sì che lo scenario di intervento abbia una proiezione temporale che va dai 5 ai 10 anni a partire dall'*istante zero* cioè dal momento di inizio realizzazione. In questo caso le informazioni dettagliate riguardanti le caratteristiche fisiche e prestazionali dell'infrastruttura non sono ancora note. È possibile, quindi, controllare il suo funzionamento generale attraverso la simulazione di un modello macroscopico del sistema (avente quindi informazioni approssimative circa l'infrastruttura e la tipologia del materiale rotabile circolante). Il non avere a disposizione dati dettagliati riguardanti il sistema esclude la possibilità di ottenere informazioni precise circa il reale tempo di percorrenza dei convogli pensati per tale infrastruttura rendendo impossibile l'elaborazione di un timetable anche solo approssimativo. Tuttavia, la macrosimulazione garantisce la possibilità di realizzare una bozza di un possibile programma di esercizio.

Le attività di pianificazione di medio periodo, invece, sono relative ad un intervallo temporale di circa un anno prima dell'entrata in servizio dell'infrastruttura. In questo caso le informazioni relative alle caratteristiche fisico-prestazionali del sistema dovrebbero essere note almeno allo stato di progettazione definitiva e, conoscendo anche il tipo di traffico che il sistema ospiterà (tipo di convogli e timetable), è possibile realizzare un modello microscopico di dettaglio della rete. Tale modello consente il calcolo preciso ed accurato dei running times relativi ai diversi tipi di convogli circolanti sulla rete e, di conseguenza, l'elaborazione di un primo *conflict-free* timetable da rendere poter comunicare all'utenza.

Infine, le attività di pianificazione tattica sono realizzabili nel breve periodo e non comportano, generalmente, costi di realizzazione per i quali è necessaria una programmazione finanziaria. Sono, in sostanza, gli interventi realizzati in seguito all'entrata in servizio dell'infrastruttura e consistono, quindi, in tutte quelle attività di gestione e controllo delle operazioni che quotidianamente i centri di dispaccio e controllo del traffico devono realizzare per il governo della circolazione ferroviaria. La pianificazione tattica, naturalmente, necessita di un modello microscopico dell'offerta del sistema ferroviario.

Le attività di pianificazione, inoltre, sono distinte in due categorie:

- *Off line*. In tal caso la pianificazione parte da un orario di esercizio già definito e mira ad aumentare l'uso dell'infrastruttura se possibile inserendo ulteriori corse.
- *On line*. In questo caso, invece, la pianificazione consiste in attività cosiddette di *rescheduling* dinamico cioè di ridefinizione dell'orario di esercizio in tempo reale. Questa attività è fondamentale per i centri di controllo operativo che devono riprogrammare lo smistamento dei treni al fine di evitare che treni in ritardo propaghino il loro ritardo ad altri treni (i cosiddetti *knock-on delays*) o, ancora, per decongestionare la rete e rientrare al più presto nei tempi programmati dal timetable originale.

Per entrambe le operazioni sopra illustrate è necessario che i centri di controllo si dotino di un apposito e dettagliato modello microscopico che descriva esattamente le caratteristiche fisico-prestazionali della rete (compreso il timetable originale) nonché la tipologia e le caratteristiche dei convogli che operano nel sistema. Infatti, attraverso la simulazione off line con modello microscopico è possibile determinare l'effetto dovuto all'inserimento di treni extra nel timetable originale, mentre in attraverso la simulazione on line è possibile definire diversi scenari derivante dall'applicazione di diverse strategie di intervento.

Nei paragrafi successivi sono descritte sinteticamente alcune delle applicazioni più diffuse in letteratura dei modelli di simulazione.

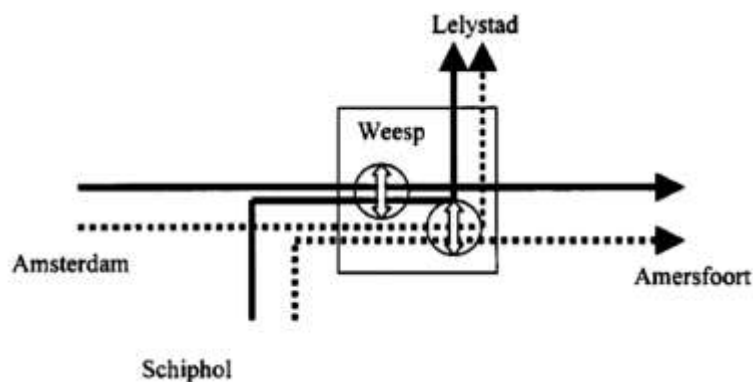
#### 4.8.1 Verifica della stabilità dell'orario di esercizio e della rete ferroviaria

Un orario di esercizio è definito *stabile* se, in caso di occorrenza di disturbi alla circolazione casuali e di piccola entità, garantisce comunque la regolarità del servizio. Ciò significa che i ritardi generati dal disturbo sono ininfluenti sugli orari di partenza/arrivo in stazione o assorbiti rapidamente ovvero che l'orario di esercizio è progettato per impedire la propagazione dei ritardi sulla rete. Il modello SIMONE (Middelkoop & Bouwmann, Testing the Stability of the Rail Network, 2002), ad esempio, nasce per verificare la stabilità sia dell'orario di esercizio che dell'infrastruttura della rete ferroviaria tedesca.

Una rete ferroviaria, invece, è definita stabile se è stata progettata in modo da consentire di realizzare strategie operative per assorbire i disturbi all'esercizio; si pensi, ad esempio, all'utilità di disporre di un tronco di manovra (cd. *tranchino*) su un tratto inter stazione per ricoverare un convoglio che si è guastato.

La stabilità è descritta attraverso degli indici di prestazione: il numero di treni ritardati, la puntualità, il rapporto tra i disturbi verificatisi ed i risultanti ritardi, ecc.

Ad esempio, Middelkoop e Bouwmann hanno studiato la stabilità di un tronco di linea con una stazione di scambio (la stazione Weesp della rete regionale tedesca): ipotizzando che la coincidenza tra le due linee confluenti sia soppressa se il tempo di attesa in stazione supera i 3 minuti, è stato simulato l'esercizio introducendo anche altri disturbi al fine di ottenere diversi scenari di degrado. L'analisi di stabilità ha consentito di definire un valore soglia del tempo di attesa alla stazione di scambio che se superato genera effetti apprezzabili sulla puntualità dei treni.



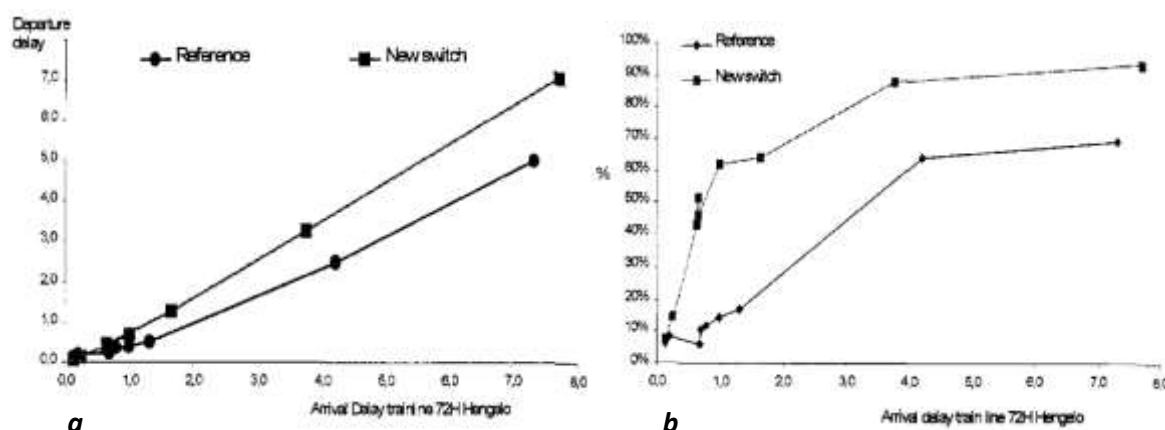
**Figura 137. Schema della stazione di scambio Weesp. (Middelkoop, Bouwmann, 2002)**

Un altro esempio applicativo è fornito dagli stessi autori che hanno verificato la stabilità della rete nel caso di aggiunta di 6 treni merci in un orario di esercizio preesistente. Anche in questo caso sono stati definiti diversi scenari di disturbo modificando sia i tempi di percorrenza che i tempi di

attesa in stazione. I risultati dell'analisi hanno dimostrato che, rispetto all'orario di esercizio originale, l'incremento massimo del ritardo totale che viene assorbito è pari al 10%, mentre la puntualità diminuisce sostanzialmente a causa degli headway ridotti per l'aggiunta delle 6 corse.

Ancora, con uno studio successivo gli autori hanno verificato i benefici apportati dal raddoppio di binario in una stazione di scambio dove era previsto uno sfalsamento dell'orario di partenza di 2 minuti tra treni successivi. Lo scenario di intervento così ipotizzato è stato, quindi, simulato imponendo diverse condizioni di disturbo (come diversi valori del tempo di attesa in stazione e diversi valori dei tempi di percorrenza delle tratte confluenti) e supponendo che la coincidenza tra due corse venga soppressa in caso di tempo di attesa superiore ai 3 minuti.

I risultati dello studio dimostrano che il raddoppio di binario da un lato comporta una riduzione dei ritardi alla partenza, ma dall'altro provoca un impatto negativo in termini di percentuale di coincidenze sopresse (figura 138):



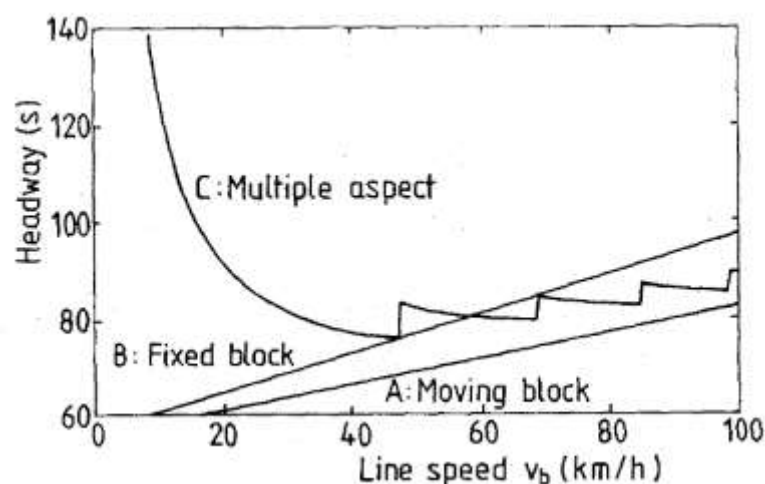
**Figura 138. Ritardi alla partenza (a) e percentuale di coincidenze sopresse (b) in caso di raddoppio del binario in una stazione di scambio con diversi disturbi (Middelkoop, Bouwmann, 2002)**

#### 4.8.2 Definizione del minimo headway di linea

I primi simulatori adottati per la definizione del minimo headway e la propagazione dei ritardi risalgono agli inizi degli anni '90. Hill e Yates (Hill & Yates, 1992) hanno sviluppato un simulatore ad eventi discreti per studiare le prestazioni sia in condizioni ordinarie che disturbate di un sistema di segnalamento ideale con distanziamento a blocco fisso. Lo scopo dell'applicazione è

sostanzialmente dimostrare come attraverso le tecniche standard di simulazione (un modello ad eventi discreti appunto) applicate alla modellazione del funzionamento dei sistemi ATP sia possibile definire degli algoritmi di ottimizzazione del segnalamento per incrementare la capacità di linea.

Con la tecnica della simulazione con avanzamento del tempo ad eventi i treni seguono dei percorsi prestabiliti ed interagiscono con il sistema di segnalamento solo quando occorrono specifici eventi (ad esempio la liberazione o l'occupazione di una sezione di blocco). Lo studio svolto dagli autori si basa sulla simulazione di tre diversi sistemi di segnalamento: blocco mobile assoluto, blocco fisso con trasmissione discontinua e blocco fisso con trasmissione continuo; l'analisi dei risultati fornisce delle curve che correlano il minimo headway alla velocità massima di linea:



**Figura 139. Minimo Headway in funzione della velocità massima di linea per diversi sistemi di segnalamento. (Hill, Yates, 1992)**

Un altro esempio di applicazione è quello di Gill e Goodman (Gill & Goodman, Computer-based Optimization Techniques for mass transit railway signalling design, 1992) che hanno proposto una tecnica di ottimizzazione per la progettazione del sistema di segnalamento con trasmissione continua per una linea ad alta capacità al fine di ridurre la frequenza delle corse (cioè ridurre l'headway).

La metodologia si articola in due fasi: nella prima è calcolata la minima distanza di arresto possibile (dalla velocità massima di linea) nel rispetto delle restrizioni di velocità statiche. La lunghezza delle sezioni di blocco è, quindi, posta uguale a tale distanza (sezioni tutte di uguale lunghezza) ed, infine, attraverso una simulazione microscopica e deterministica di tale layout è

calcolato il minimo signal headway cioè la distanza minima tra un segnale di avviso ed un segnale principale.

Il modello di ottimizzazione ha come funzione obiettivo la distanza di frenatura che, in caso di segnalamento con trasmissione continua (ad esempio correnti codificate) e di veicolo isolato, risulta per il generico salto di velocità :

$$f(v_i, v_{i+1}) = t_r v_i + \frac{b_s}{2J} (v_{i+1} + v_i) + \frac{1}{2b_s} (v_i^2 - v_{i+1}^2)$$

Nel caso di  $n$  salti di velocità cioè di segnalamento ad  $n$  aspetti la funzione obiettivo da minimizzare rappresenta la somma delle differenze tra le distanze di arresto di sezioni di blocco successive:

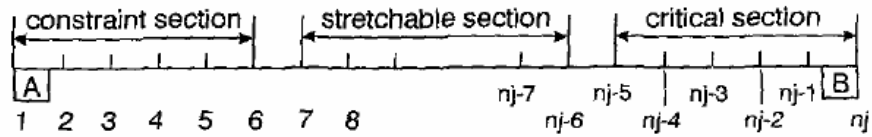
$$F(v_1, v_2, v_3, \dots, v_{n-2}) = (f(v_m, v_1) - f(v_1, v_2)) + \sum_{i=1}^{n-4} (f(v_i, v_{i+1}) - f(v_{i+1}, v_{i+2})) + (f(v_{n-3}, v_{n-2}) - f(v_{n-2}, 0))$$

in cui  $(v_1, v_2, v_3, \dots, v_{n-2})$  è il vettore di valori di velocità che minimizzano la funzione obiettivo  $F$  cioè il numero  $n$  di sezioni di blocco di uguale lunghezza che garantisce l'arresto in sicurezza di un convoglio dalla velocità massima di linea  $v_m$  alla velocità nulla.

Questa tecnica di ottimizzazione trova maggiore utilità soprattutto nelle sezioni di blocco critiche come ad esempio le aree stazione. Sono, infatti, queste sezioni che condizionano il minimo headway di linea (e, quindi, la capacità). Pertanto, si potrebbe pensare di adottare il layout di sezioni ottimizzato in ambito stazione e di prevedere delle sezioni di blocco più estese in piena linea in cui i tempi di occupazione sono minori riducendo in tal modo il numero di circuiti di binario ed i relativi costi di realizzazione e gestione.

Infatti, Chang and Du (Chang & Du, Improved optimization method using genetic algorithms for mass transit signalling block-layout design, 1998) definiscono tre tipologie di sezioni di blocco:

- la *constraint section*, che individua l'area della stazione di partenza e che deve avere un layout di sezioni di blocco ottimizzato per incrementare la capacità;
- la *stretchable section* che individua la tratta interstazione e può avere un numero limitato di sezioni di blocco per ridurre i circuiti di binario;
- la *critical section* che individua l'area della stazione di arrivo e che deve anch'essa avere un layout ottimizzato per incrementare la capacità.



**Figura 140. Schema di sezioni di blocco equi distanziate per una linea metropolitana (Chang, Du, 1998)**

Chang e Du hanno migliorato la tecnica di ottimizzazione definita da Gill e Goodmann. Questi ultimi, infatti, definiscono la soluzione ottima (lunghezza dei codici, sezioni “constraint” e sezioni “critiche”), con il metodo del gradiente e, successivamente, procedono ad un rilassamento dei vincoli cioè ad un allungamento dei blocchi nella sezione stretchable attraverso un processo di post ottimizzazione.

Successivamente verificano che il layout delle sezioni di blocco ottenuto garantisca il distanziamento di sicurezza del sistema ATP cioè si verifica per ogni sezione di blocco che la distanza di arresto di emergenza sia minore della lunghezza della sezione stessa.

Chang e Du, invece, definiscono una funzione obiettivo diversa per ciascuna tipologia di sezione (*constraint*, *stretchable* e *critical*) includendo in esse i vincoli relativi al minimo headway da garantire ed alla lunghezza minima della sezione di blocco secondo il sistema ATP. In questo modo non è più necessaria né la procedura di post ottimizzazione per allungare i blocchi della sezione stretchable né quella di verifica sulle curve di frenatura di emergenza.

Un'altra metodologia sviluppata per progettare una configurazione di sezioni di blocco di lunghezza uguale minimizzando il consumo di energia di trazione è quella definita da Ke et al. (Ke, Chen, & Lin, 2009). In sostanza, tale metodologia prevede una prima ottimizzazione per definire la configurazione delle sezioni che riduce l'headway ed una seconda ottimizzazione in cui viene definito il vettore delle velocità medie di percorrenza per ciascuna sezione di blocco che minimizza il consumo di energia nella sezione stessa. Le velocità che garantiscono il risparmio energetico sono determinate imponendo che non superino le velocità massime di codice per ciascun blocco ( $v_d$ ) ed il consumo di energia nella sezione k-esima è calcolato come:

$$E_k = \int_0^T F_k \cdot v_k \cdot dt$$

in cui  $F_k$  è lo sforzo di trazione,  $v_k$  la velocità media nella sezione k-esima e  $T$  il tempo di percorrenza.

Pertanto, la funzione obiettivo risulta:

$$\min \sum_{k=1}^n E_k(v_k); \quad \text{con} \quad v_k \leq v_d.$$

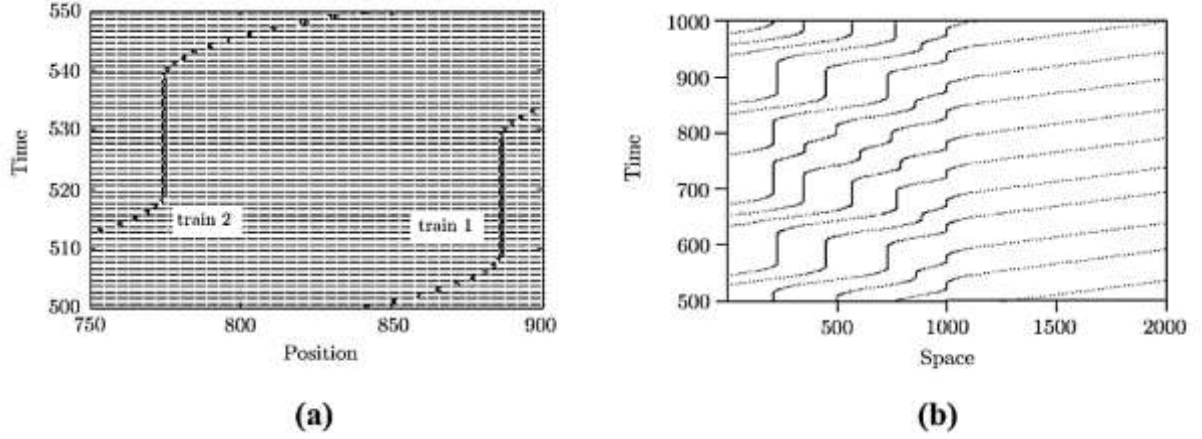
in cui  $n$  è il numero dei blocchi considerato.



Indipendentemente dalla metodologia di ottimizzazione applicata il minimo headway relativo al layout delle sezioni di blocco ottimizzato deve essere sempre calcolato attraverso una simulazione microscopica ed applicando il modello dei tempi di blocco (Gill & Goodman, Computer-Based Optimization Technique for Mass Transit Railway Signalling Design, 1992), (Chang & Du, Improved optimization method using genetic algorithms for mass transit signalling block-layout design, 1998), (Chang & Du, Further Improvement Of Optimization Method For Mass Transit Signalling Block-Layout Design Using Differential Evolution, 1999).

Per quanto riguarda la simulazione del traffico ferroviario con distanziamento a blocco mobile ad oggi in letteratura sono disponibili pochi modelli. Uno di questi è il modello proposto da Tang e Li (Tang & Li, 2007). Il modello di simulazione è del tipo “cellular automata”: un *automa cellulare* è un sistema che viene discretizzato con una griglia costituita da celle che può avere una qualunque dimensione finita; ogni porzione limitata di spazio deve contenere solo un numero finito di celle. Ciascuna di queste celle può assumere un insieme finito di stati (ad esempio, “libera” o “occupata”). Per ogni cella è necessario anche definire l'insieme delle celle che sono da considerare “vicine” alla cella data (ad esempio, nel caso di un sistema di segnalamento a blocco fisso si possono definire “vicine” due sezioni di blocco adiacenti). Ad un certo tempo  $t=0$  si assegna ad ogni cella un determinato stato. L'insieme di questi stati costituisce lo stato iniziale dell'automa cellulare. Dopo un tempo prefissato, ad esempio uno step di simulazione, ogni cella cambierà stato contemporaneamente a tutte le altre, secondo una regola fissata (che varia a seconda dell'automa cellulare preso in considerazione). Il modo in cui cambia stato una cella dipende solamente dal proprio stato attuale e dagli stati delle celle “vicine”. Nel modello CA la lunghezza di una cella è posta pari ad 1 m ed uno step di simulazione corrisponde a 1 s; ciò significa, ad esempio, che  $v_{max} = 10 \text{ cells/update}$  corrisponde ad una  $v_{max} = 36 \text{ km/h}$ .

Il modello CA sviluppato da Tang e Li nasce per simulare l'inseguimento treni con ATP a blocco mobile assoluto. Il modello è implementato su una linea teorica di lunghezza pari a 2 km con un'unica stazione intermedia. I risultati delle simulazioni svolte dimostrano che le traiettorie dei veicoli in regime di blocco mobile assoluto hanno andamento simile a quelle del traffico stradale; come mostrato nella seguente figura, infatti, sono presenti le tipiche onde del moto in regime “stop-and-go” proprio in prossimità della stazione intermedia:



**Figura 141. (a) Griglia del modello CA; (b)Traiettorie veicoli con blocco mobile assoluto per  $v_{\max} = 20$  celle/update ( $\sim 42$  km/h) e  $t_d = 10$  updates (10 s). (Tang e Li, 2007)**

In generale, il distanziamento temporale o headway è definito come l'intervallo di tempo tra il passaggio di un veicolo in una sezione ed il passaggio del veicolo successivo. Nel traffico ferroviario, tuttavia, l'espressione analitica dell'headway si differenzia a seconda del tipo di segnalamento (Hill & Yates, 1992), (Tang & Li, 2007).

Infatti, in caso di blocco mobile l'headway risulta pari a:

$$h_{\min} = t_r + t_b + t_d + t_f = t_r + \frac{v_b}{b} + t_d + \sqrt{\frac{2(L_d + L_t)}{a}}$$

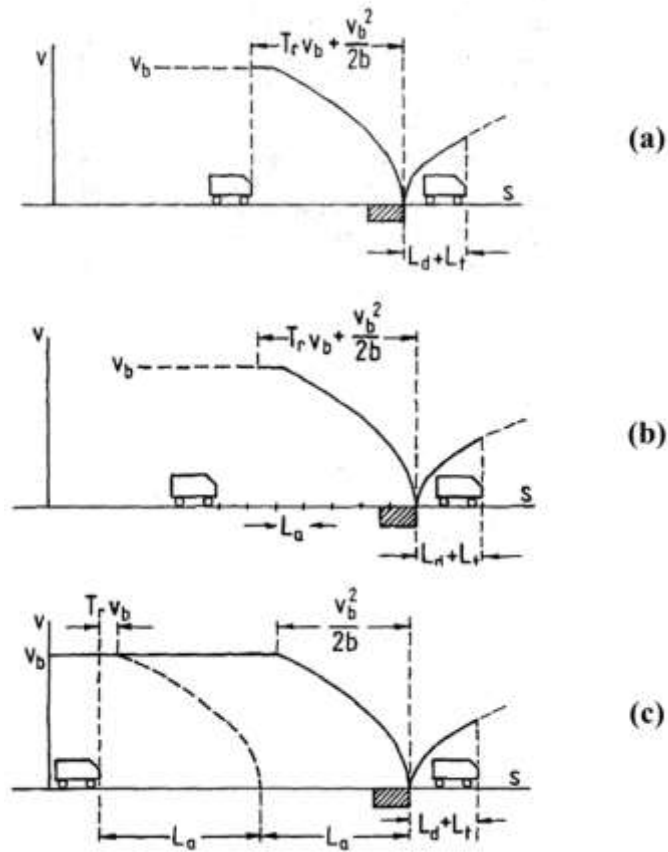
in cui  $v_b$  è la velocità di inizio frenatura,  $t_r$  è il tempo di reazione del sistema frenante e del macchinista,  $t_b$  è il tempo per frenare a zero,  $t_d$  è il tempo di sosta e  $t_f$  è il tempo necessario al veicolo leader per percorrere uno spazio pari a  $L_d + L_t$  con  $L_t$  lunghezza del veicolo leader (figura 25, (a)).

In caso, invece, di blocco fisso con trasmissione discontinua l'espressione del minimo headway è (figura 25, (b)):

$$h_{\min} = 2t_r + t_b + t_d + t_f = t_r + \frac{3v_b}{2b} + t_d + \sqrt{\frac{2(L_d + L_t)}{a}}$$

In caso, infine, di blocco fisso con trasmissione continua l'headway sarà pari a (figura 25, (c)):

$$h_{\min} \approx \frac{L_a}{v_b} \cdot \left( 2 + \text{INT} \left\{ \frac{t_r \cdot v_b + v_b^2 / 2b}{L_a} \right\} \right) + \frac{v_b}{2b} + t_d + \sqrt{\frac{2(L_d + L_t)}{a}}$$



**Figura 142. Distanziamento minimo spaziale: a) con blocco mobile; b) blocco fisso e trasmissione continua; c) con blocco fisso e trasmissione discontinua. (Hill e Yates, 1992)**

Nel modello CA di Tang e Li viene studiato il caso di linea a singolo binario con un'unica stazione a singolo binario (un'unica piattaforma) e blocco mobile assoluto. A seconda della velocità massima di linea e dell'accelerazione massima imposte possono verificarsi due casi :

- $\frac{v_{max}^2}{2a} \geq \sqrt{\frac{2(L_d+L_t)}{a}}$  cioè il leader percorre la distanza  $(L_d + L_t)$  in accelerazione. In tal caso il minimo headway risulta pari a:

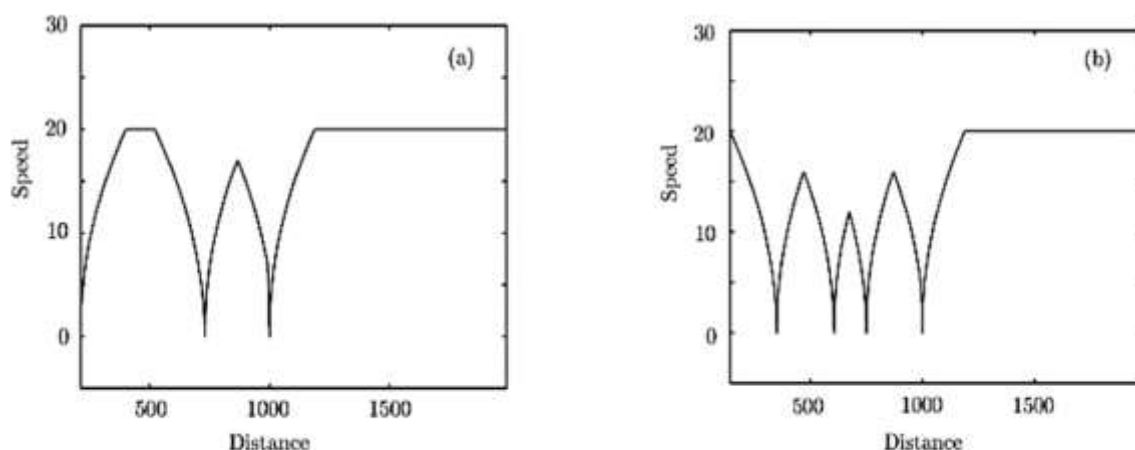
$$h_{min} = t_r + t_b + t_d + t_f = t_r + \frac{v_b}{b} + t_d + \sqrt{\frac{2(L_d+L_t)}{a}} \quad (1)$$

- $\frac{v_{max}^2}{2a} < \sqrt{\frac{2(L_d+L_t)}{a}}$  cioè il leader percorre la la distanza  $(L_d + L_t)$  prima in accelerazione e poi a regime. In tal caso, invece, il minimo headway risulta pari a:

$$h_{min} = t_r + t_b + t_d + t_f = t_r + \frac{v_b}{b} + t_d + \frac{2a(L_d+L_t)+v_{max}^2}{2av_{max}} \quad (2)$$

Le equazioni (1) e (2) sono usate dagli autori per validare i risultati ottenuti dalle simulazioni.

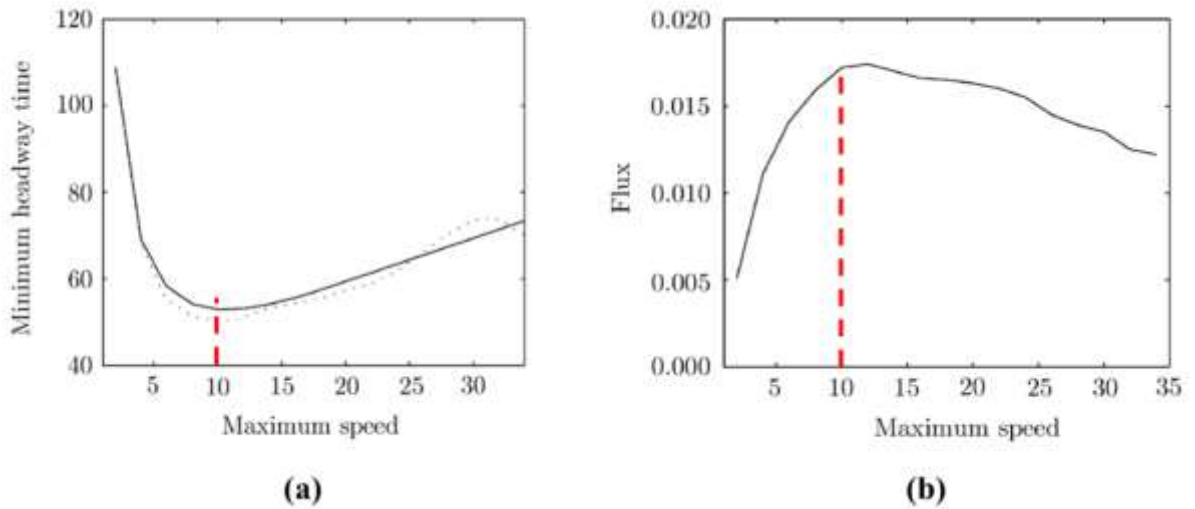
Assumendo, dunque, un dominio tempo-spazio di simulazione pari a 1000 per 2000 celle, l'analisi dei risultati mostra che il convoglio follower, essendo condizionato dal veicolo leader, in approccio alla stazione modifica progressivamente la sua velocità fino a raggiungere il punto di arresto e, come si nota nella seguente figura, il numero di arresti e ripartenze nella distanza di approccio alla stazione aumenta all'aumentare del tempo di sosta imposto:



**Figura 143. Fase di approccio in stazione: a)  $v_{\max} = 20$  celle/update,  $t_d = 10$  updates ; b)  $v_{\max} = 20$  celle/update,  $t_d = 40$  updates. (Tang e Li, 2007)**

Inoltre, i risultati delle simulazioni dimostrano che l'headway non dipende linearmente dalla velocità del veicolo in quanto il tempo di frenatura aumenta con la velocità massima; il minimo headway con blocco mobile assoluto si verifica per un valore di velocità di circa 10 celle/update (cioè circa 36 km/h) ed è un valore molto prossimo a quello ottenuto con le equazioni (1) e (2).

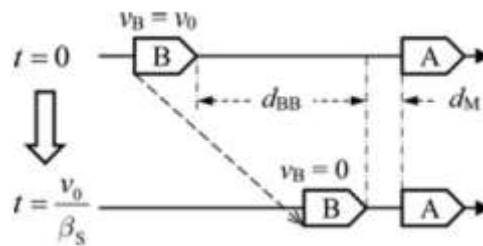
Inoltre, i risultati confermano che il minimo headway e la capacità di linea si verificano in corrispondenza della velocità massima. Tuttavia, in caso di blocco fisso, la capacità massima si ottiene se tutti i convogli viaggiano alla velocità massima imposta, mentre in caso di blocco mobile ogni valore di velocità può essere considerato come un valore di progetto. Per date caratteristiche fisico-prestazionali di un convoglio sussiste, quindi, una relazione dinamica tra velocità massima e capacità; la funzione di relazione presenta un punto di massimo che corrisponde, anche in questo caso, al valore di 10 celle/update. La portata  $q$  è valutata come  $q = (1/L) \cdot \sum_{i=1}^N v_i$  in cui  $L$  è la lunghezza totale del tracciato e  $v_i$  la velocità media spaziale del veicolo  $i$ -esimo. Le seguenti figure mostrano le funzioni di relazione:



**Figura 144. (a) Relazione tra il minimo headway e massima velocità per  $t_d = 10$  updates (curva tratteggiata) e  $t_d = 20$  updates; (b) Relazione tra portata e massima velocità per  $t_d = 20$  updates**

L'incremento di capacità atteso dal distanziamento con blocco mobile deriva dalla possibilità di far viaggiare i convogli ad una distanza variabile nel tempo, ma sempre la minore possibile nel rispetto dei vincoli di sicurezza. E' stato dimostrato, infatti, che un controllo sulla velocità sincronizzato tra veicoli successivi consente di aumentare la capacità di linea (Takagi, 2012).

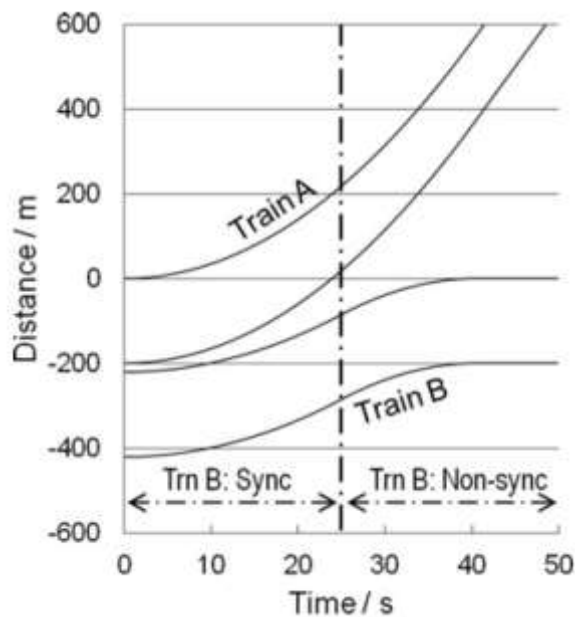
In particolare, imponendo che i veicoli partano contemporaneamente da fermi, ipotizzando pendenza del tracciato nulla, decelerazione costante sia rispetto al tempo che allo spazio per tutti i veicoli e contraccolpo infinito, il modello di controllo sincronizzato prevede che ciascun veicolo modifichi la propria accelerazione in modo da ottenere il minimo distanziamento possibile con il veicolo che lo precede. il modello proposto da Takagi assume un distanziamento a blocco mobile assoluto (*Pure Moving Block*); per  $t=0$  la distanza tra la coda del veicolo leader e la testa del veicolo follower è pari al distanziamento minimo definito come  $d_{min}(t) = d_M + \frac{v_B^2}{2\beta_s}$  in cui  $\beta_s$  è il valore massimo di decelerazione,  $d_M$  il margine di sicurezza e  $v_B$  la velocità corrente del veicolo follower.



**Figura 145. Distanziamento minimo con blocco mobile assoluto (PMB). (Takagi, 2012)**

Sotto queste ipotesi semplificative, la sincronizzazione del controllo di velocità consiste nel modificare la velocità del veicolo B in modo che per ogni istante  $t$  la distanza leader e follower sia uguale al distanziamento minimo. Questa condizione viene garantita imponendo che in ogni istante l'accelerazione (o decelerazione) del veicolo follower (B) sia pari a  $\beta_B = \beta_s \cdot \frac{v_B - v_A}{v_B}$ .

I risultati ottenuti dalle simulazioni dimostrano che il controllo sincronizzato consente di ridurre il distanziamento temporale tra la partenza e l'arrivo in stazione (*departure-to-arrival headway*) cioè tra la partenza del leader (A) e l'arrivo del follower (B) con conseguenti effetti positivi sulla capacità. Assumendo che il tempo di attesa in stazione del veicolo A sia molto lungo il *departure-to-arrival headway* viene minimizzato scomponendo l'arresto e la ripartenza in stazione in due fasi successive. Lo stato iniziale prevede il veicolo A fermo in stazione ed il veicolo B fermo al segnale di ingresso stazione. Nella prima fase i due veicoli accelerano simultaneamente ed il veicolo B continua in moto sincronizzato sino al punto che gli consente di arrestarsi in banchina con la decelerazione massima  $\beta_s$ , nella seconda il veicolo B termina la sincronizzazione ed inizia la frenatura per fermarsi alla banchina. Il modello definisce, quindi, l'istante al quale il veicolo B deve interrompere la sincronizzazione ed iniziare a frenare  $t_B$  assumendo nullo l'istante in cui i veicoli sono entrambi fermi. Come mostrato nella seguente figura l'applicazione di questo metodo prevede che il veicolo B si fermi al segnale di ingresso stazione (posto a -200 m rispetto al punto di arresto in banchina) e ciò comporta un aumento del consumo di energia dovuto all'arresto e ripartenza oltre a costituire un discomfort per i passeggeri:



**Figura 146. Controllo sincronizzato per ridurre il *departure-to-arrival headway* con blocco mobile assoluto,  $t_B = 25$  s (Takagi, 2012)**

#### 4.8.3 Progettazione robusta dell'orario di esercizio

Come già anticipato, un orario di esercizio è definito “robusto” se prevede dei tempi “cuscinetto” che consentono di assorbire ritardi ordinari (di modesta entità) evitando il fenomeno della propagazione. In particolare, questi tempi supplementari sono definiti:

- *recovery times* se tempi supplementari a quelli minimi di percorrenza;
- *buffer times* se tempi supplementari al periodo compreso tra la partenza di due veicoli successivi in stazione.

Per verificare la robustezza di un orario di esercizio è necessario simulare diversi scenari in cui si riproducono dei disturbi casuali alla circolazione sia in ambito stazione che in piena linea.

Kroon et al. (Kroon, Dekker, & Vromans, 2007) hanno definito una procedura di ottimizzazione per l'assegnazione dei tempi supplementari ricorrendo alla simulazione di un dato orario di servizio con disturbi stocastici. La procedura consiste in un ciclo di ottimizzazione costituito da due fasi successive iterate nel ciclo: calcolo del ritardo totale, ottimizzazione dell'allocazione dei tempi supplementari attraverso la minimizzazione dei ritardi di arrivo in stazione.

In particolare, le due fasi sono chiamate *Timetable Part* e *Simulation Part*. La *Timetable Part* rappresenta l'orario di esercizio dato come un problema di programmazione di eventi periodici (*Periodic Event Scheduling Problem*) come proposto dagli autori Serafini ed Ukovich (Serafini & Ukovich, 1989).

Secondo tale modello, l'istante di occorrenza programmato per l'evento  $e$  è fornito dal parametro  $v_e$  ed il tempo di processo tra due generici eventi  $e$  ed  $e'$  è definito come:

$$M_{e,e'} + s_{e,e'} = v_{e'} - v_e$$

in cui  $M_{e,e'}$  è il tempo minimo di processo tra due eventi (ad esempio il tempo minimo di percorrenza tra la partenza dalla stazione A e l'arrivo alla stazione B),  $s_{e,e'}$  è il tempo supplementare per il tempo di processo considerato ( $e, e'$ ), mentre  $v_{e'}$  ed  $v_e$  sono rispettivamente l'istante finale ed iniziale del tempo di processo tra i due eventi considerati (ad esempio, l'istante di arrivo alla stazione B e l'istante di partenza dalla stazione A).

Quindi, la correzione ciclica dell'orario di esercizio è realizzata imponendo vincoli descritti da equazioni del tipo come quelle presentate di seguito:

$$0 \leq v_{e'} - v_e \leq T$$

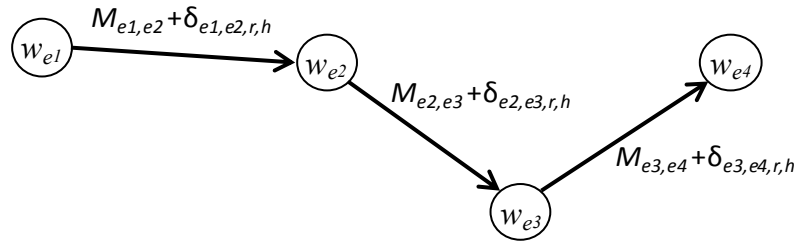
$$\sum_{(e,e')} s_{e,e'} \leq Sq$$

in cui il primo vincolo assicura che la durata del processo ( $e, e'$ ) sia non superiore alla durata dell'intero ciclo di ottimizzazione  $T$  (in genere assunto pari a 1 ora), mentre il secondo vincolo garantisce che la somma di tutti i tempi supplementari riferiti a tutte le operazioni schedate ( $e, e'$ ) non deve superare un certo valore di soglia che se superato causerebbe una riduzione della potenzialità di uso dell'infrastruttura.

La seconda fase, invece, cioè la *Simulation Part* in cui si procede a realizzare  $R$  repliche di simulazioni con scenari diversi cioè applicando per ciascuna replica  $r$  uno specifico set di valori dei disturbi operando secondo l'orario di esercizio definito nella *Timetable Part* al fine proprio di testare la robustezza dell'orario rispetto a tali disturbi stocastici. Per migliorare i tempi computazionali il codice di Kroon et al. utilizza un modello di rete macroscopico.

Pertanto, gli eventi considerati sono soltanto quelli relativi alle stazioni (ad esempio arrivo/partenza a/da una stazione di un convoglio) escludendo dalla simulazione gli eventi relativi agli elementi infrastrutturali di dettaglio maggiore come ad esempio la liberazione/occupazione delle sezioni di blocco. In particolare, nella seguente figura è mostrato uno schema del processo di simulazione così come previsto dalla *Simulation Part*:





**Figura 147. Processo stocastico degli eventi nel metodo di ottimizzazione stocastico sviluppato da Kroon et al. (2007)**

Gli istanti iniziali di ogni evento  $e$  sono i parametri  $w_e$ , il tempo di processo  $M_{e,e'}$  è una variabile aleatoria in quanto costituita da un'aliquota deterministica (ad esempio il tempo minimo di percorrenza di una tratta interstazione) e da un'aliquota aleatoria cioè il disturbo stocastico che dipende non solo dalla replica  $r$ , ma anche dal ciclo  $h$ -esimo di ottimizzazione del timetable. Il modello, allora, è rappresentato analiticamente da equazioni del tipo:

$$M_{e,e'} + \delta_{e,e',r,h} = w_{e',r,h} - w_{e,r,h} \quad \text{per tutti gli eventi } (e,e').$$

Pertanto, per ciascuna delle  $R$  repliche è estratto un vettore dei valori dei disturbi  $\delta_{e,r,h}$  cioè dei ritardi da una distribuzione esponenziale negativa ed è calcolato il ritardo di arrivo in stazione come  $\Delta_{e,r,h} = w_{e,r,h} - v_e$  per la replica  $r$ -esima ed il ciclo  $h$ -esimo. Per migliorare la robustezza dell'orario di esercizio, allora, si minimizza la funzione obiettivo del ritardo totale medio pesato:

$$\min \Delta = \sum_{e \in E_a} \sum_{r=1}^R \sum_{h=1}^H c_e \cdot \Delta_{e,r,h}$$

in cui  $E_a$  è il numero totale degli eventi del tipo “arrivo” in stazione,  $R$  è il numero totale di repliche,  $H$  è il numero totale dei cicli di ottimizzazione,  $c_e$  è il peso attribuito al ritardo nella specifica stazione (in quanto un certo ritardo in una stazione di scambio, ad esempio, è sicuramente più impattante che in una stazione di linea).

Al termine dei cicli di ottimizzazione si ottengono l'orario di esercizio più robusto di quello di partenza ed un nuovo set di valori dei tempi supplementari  $s_{e,e'}$ . L'orario così ottenuto viene, quindi, ancora ottimizzato attraverso un nuovo ciclo di simulazioni con disturbi stocastici e così via fino a quando l'orario di esercizio di input di un ciclo di ottimizzazione non coincide con quello di output.

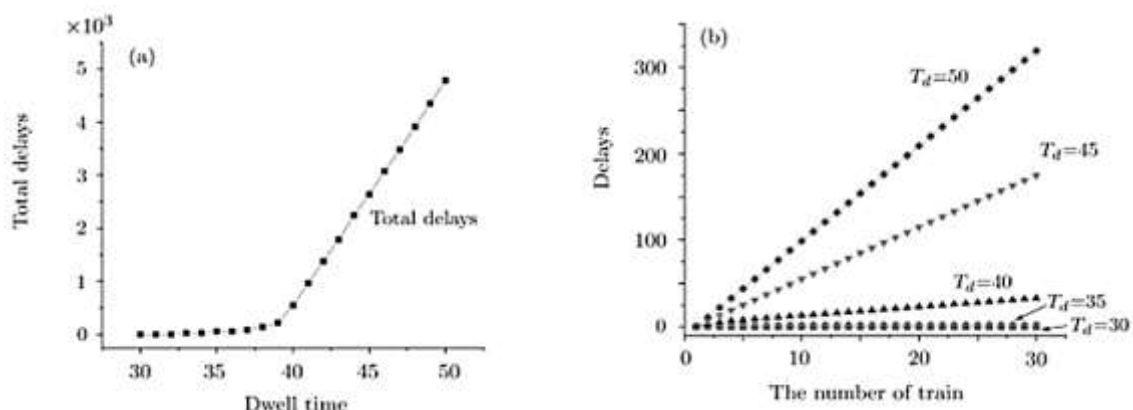
Per i sistemi con blocco mobile, sono disponibili in letteratura alcuni studi sulla corrente veicolare. Ad esempio, Xu et al. (XU, Cao, Li, & Luo, 2012) hanno studiato gli effetti indotti sul flusso veicolare sia dal tempo di attesa in stazione che dalla lunghezza del convoglio. Il modello proposto è del tipo cellular automata ed è applicato su una linea di lunghezza pari a 4000 celle da 1 metro,

con un'unica stazione intermedia e considerando un periodo di simulazione pari a 2000 updates da 1 secondo.

Il distanziamento tra veicoli è con blocco mobile relativo con approccio “hit soft wall”. Come già descritto nei capitoli precedenti, è prassi distinguere due diversi regimi di frenatura:

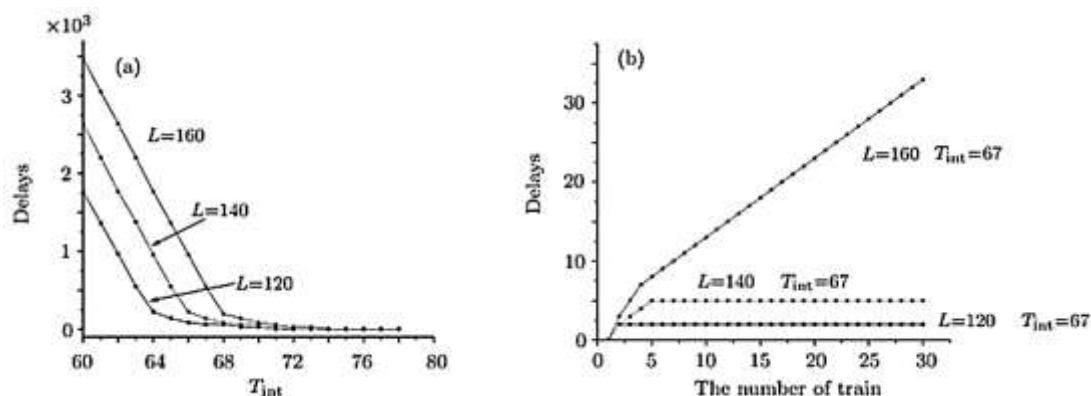
- il regime “hit hard wall” assume che il veicolo leader abbia decelerazione infinita ed il veicolo follower freni con la decelerazione massima di servizio. Tale regime mira a garantire stabilità e comfort di marcia per gli arresti programmati;
- il regime “hit soft wall” assume che il veicolo leader freni con la decelerazione massima di emergenza ed il veicolo follower freni con la decelerazione massima di servizio. Tale regime mira a garantire l'arresto in sicurezza in condizioni di emergenza (arresti improvvisi).

Adottando un regime di frenatura del tipo “soft wall”, gli autori hanno definito una funzione di relazione tra i ritardi di arrivo/partenza in/dalla stazione ed il tempo di attesa in stazione. I risultati dimostrano che, come previsto dalla teoria, all'aumentare del tempo di sosta in stazione anche il ritardo totale aumenta; come è facile intuire ciò accade poiché, essendo fissato il cadenzamento cioè l'intertempo tra i tempi di partenza, la densità sulla tratta interstazione è costante e, quindi, maggiore è il tempo di sosta in stazione, maggiore è il tempo di occupazione della stazione e maggiore, quindi, il tempo che un convoglio successivo deve attendere per entrare in stazione. Pertanto, il ritardo si propaga da valle verso monte aumentando linearmente. Allora, solo aumentando l'intertempo tra una partenza e la successiva si riesce a ridurre la densità ed a ridurre i ritardi progressivamente. Le seguenti figure mostrano che i ritardi totali dei treni aumentano all'aumentare del tempo di sosta (a) e come il ritardo di ciascun treno si trasmetta al successivo (propagazione) e l'entità sia maggiore all'aumentare del tempo di sosta in stazione:



**Figura 148. Ritardo totale in funzione del tempo di sosta (a); Ritardo del singolo treno in funzione del tempo di sosta (b). (XU et al., 2012)**

Per quanto riguarda l'effetto della lunghezza dei veicoli i risultati mostrano che, convogli con diversa lunghezza hanno cadenzamenti critici diversi cioè valori di intertempo diversi che segnano il passaggio dalla condizione di flusso congestionato a flusso libero: ad esempio, per  $L_{\text{treno}} = 120$  celle (cioè 120 m) il valore critico dell'intertempo è 64 secondi, mentre se  $L_{\text{treno}} = 160$  m il valore critico è 68 secondi. Inoltre, il veicolo più lungo porta ritardi maggiori a parità di intertempo ed il ritardo si propaga costantemente ai veicoli successivi :



**Figura 149. Ritardo totale in funzione della lunghezza del veicolo e del tempo di sosta (a); Ritardo del singolo treno in funzione della lunghezza del veicolo a parità di intertempo (b). (XU et al., 2012)**

#### 4.8.4 Correzione in tempo reale dell'orario di esercizio

L'obiettivo più ambizioso al quale applicare un modello di simulazione è sicuramente quello di riprogrammare l'orario di esercizio in tempo reale (on line) per mitigare la propagazione dei ritardi in caso disturbi alla circolazione casuali (ad esempio, guasti di elementi, attese prolungate in stazione, ecc.).

In tali circostanze spetta al Dirigente Centrale Operativo il compito di prevedere i possibili conflitti di allocazione infrastruttura e modificare i percorsi dei veicoli al fine di ripristinare nel più breve tempo possibile le condizioni ordinarie di esercizio.

Nel caso di reti ferroviarie complesse è evidente come l'ausilio di modelli e codici di simulazione sia indispensabile. Infatti, un modello di simulazione on line dovrebbe garantire le seguenti funzionalità:

rilevare informazioni sulla circolazione, prevedere i punti di conflitto seguendo l'orario di esercizio ordinario attraverso simulazione, risolvere i conflitti modificando l'orario.

Inoltre, le operazioni di *rescheduling* cioè di modifica in tempo reale dell'orario di esercizio possono includere anche diverse strategie a seconda dei diversi obiettivi da raggiungere (ad esempio minimizzare il ritardo totale di arrivo).

In generale, i tools che consentono il *rescheduling* real-time sono composti da diversi moduli:

- *Conflict detection module*, è il modulo che rileva o prevede attraverso simulazione delle corse tutti i punti di conflitto sulla rete per un certo periodo di riferimento.
- *Conflict resolution module*, è il modulo che risolve i punti di conflitto fornendo in output un nuovo orario di esercizio privo di conflitti, seguendo le strategie predefinite.

Il modulo che si occupa della previsione dei punti di conflitto è, generalmente, basato su un modello di simulazione microscopico dal momento che è necessario calcolare con precisione i tempi di percorrenza delle varie tratte interstazione.

Una volta che sono state definite le traiettorie dei veicoli è possibile calcolare i tempi di blocco ed individuare i punti di conflitto, dovuti alla sovrapposizione dei tempi di blocco, applicando il modello dei tempi di blocco (Happel, 1959). Oltre a tali conflitti devono essere previsti anche quelli relativi alle coincidenze che potrebbero essere sopresse se il ritardo supera un certo valore di soglia.

Il modulo di risoluzione dei conflitti, invece, deve ridefinire gli orari di partenza/arrivo ed esistono diversi approcci che sono: la simulazione asincrona, la simulazione sincrona e le tecniche di ottimizzazione.

#### **4.8.4.1 Rescheduling con simulazione asincrona**

Come già descritto, i modelli di simulazione asincrona organizzano la successione degli eventi da processare in base alla priorità assegnata ai treni e sono prevalentemente utilizzati per la progettazione degli orari di esercizio. Pertanto, se il *rescheduling* viene fatto con tali modelli è comunque necessario specificare la priorità delle varie corse (treni) da simulare.

Ad esempio, se nel corso dell'esercizio su una rete ferroviaria insorge un conflitto tra un convoglio a lunga percorrenza, ad esempio un Intercity, ed un convoglio merci, il modello asincrono di *rescheduling* risolverà il conflitto assegnando la priorità più elevata al treno Intercity cioè dando la precedenza di allocazione delle tratte ad esso destinando l'infrastruttura per il tempo rimanente al convoglio merci.

Pertanto, un modello di *rescheduling* asincrono simula dapprima le corse dei treni con il livello di priorità maggiore programmando i loro orari di esercizio senza punti di conflitto e,

successivamente, simula le corse dei treni con priorità inferiore assegnando loro gli orari di esercizio risultanti dalle finestre temporali libere lasciate dalle corse di categoria superiore senza originare punti di conflitto, e così via.

Per eliminare i punti di conflitto possono essere adottate diverse strategie operative. Il codice ASDIS (Jacobs, Rechnergestützte Konfliktermittlung und Entscheidungsunterstützung bei der Disposition des Zuglaufs, 2003), (Jacobs, Reducing Delays by Means of Computer-Aided “On-The-Spot” Rescheduling, 2004), ad esempio, consente di applicare le seguenti strategie: a) uso di percorsi alternativi; b) prolungamento dei tempi di sosta in stazione; c) ridefinizione delle sedi di incrocio; d) inserimento di nuove sedi di incrocio per consentire precedenza e sorpassi; e) diminuzione delle velocità massime operative di tratta per prolungare i tempi di percorrenza.

#### **4.8.4.2 Rescheduling con simulazione sincrona**

Ad oggi l'applicazione di modelli di rescheduling con simulazione sincrona è possibile solo per la verifica delle diverse strategie operative. Il DCO può quindi scegliere la più idonea disponendo di un quadro degli effetti indotti da ciascuna strategia. Tuttavia, dal momento che un modello sincrono simula contemporaneamente tutti i veicoli presenti sulla rete cioè rispettando l'ordine di occorrenza degli eventi come nella realtà è praticamente impossibile che riesca a fornire automaticamente un orario di esercizio privo di punti di conflitto cioè che riesca a definire dei tempi di percorrenza che non generino sovrapposizione nell'allocazione delle tratte.

#### **4.8.4.3 Tecniche di ottimizzazione**

Un'ulteriore alternativa per il rescheduling, oltre all'applicazione di modelli di simulazione sincrona o asincrona, consiste nella definizione di tecniche di ottimizzazione sviluppate ad hoc per soddisfare specifici obiettivi operativi come, ad esempio, la riduzione del periodo di tempo per ripristinare condizioni ordinarie di circolazione in seguito ad un disturbo.

In tal caso, allora, è necessario definire il modello di ottimizzazione e, quindi, una funzione obiettivo e le relazioni analitiche dei vincoli imposti al problema. Dal momento che i metodi di risoluzione sono complessi è possibile definire un numero ridotto di vincoli per non aumentare il tempo computazionale oltre valori che lo renderebbero inutilizzabile nelle operazioni real time di gestione del traffico ferroviario.

In letteratura si trovano diverse tecniche di ottimizzazione che applicano diversi metodi di soluzione del problema di ottimizzazione.

Ad esempio, una delle tecniche proposte prevede l'uso combinato del metodo *branch and bound* e di un algoritmo genetico che migliora progressivamente la soluzione iniziale accoppiando diverse soluzioni (Wegele & Schnieder, 2004).

Ancora, D'Ariano et al. (D'Ariano & Albrecht, Running Time Re-Optimization During Real-Time Timetable Perturbations, 2006), (D'Ariano & Pranzo, An Advanced Real-Time Train Dispatching System For Minimizing The Propagation Of Delays In A Dispatching Area Under Severe Disturbances, 2007), (D'Ariano, Pranzo, & Hansen, Conflict Resolution and Train Speed Coordination for solving Real-Time Timetable Perturbations, 2007) hanno definito una tecnica di ottimizzazione basata sulla simulazione microscopica del traffico ferroviario con i cosiddetti "grafi alternativi". Il modello con i grafi alternativi identifica le operazioni di circolazione come attività (o processi) e consente di modellare sia le principali componenti dell'infrastruttura (come ad esempio gli arrivi e le partenze in stazione), ma anche quelle del segnalamento (come ad esempio l'occupazione/liberazione delle sezioni di blocco). Ciò è reso possibile in quanto il modello di simulazione è del tipo microscopico.

Tuttavia, queste tecniche di ottimizzazione assumono i tempi di percorrenza come variabili deterministiche cioè in assenza di disturbi.

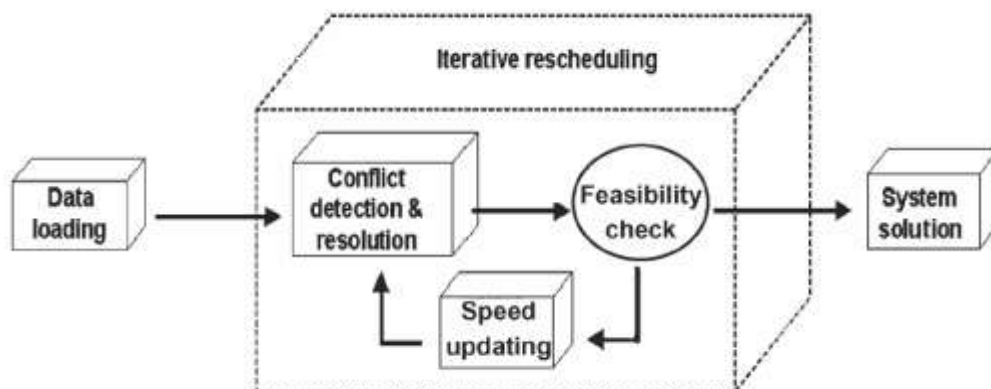
Pertanto, le fasi del moto vario (accelerazione e decelerazione) sono simulate in modo approssimato fornendo, quindi, dei tempi di percorrenza e dei tempi di occupazione delle tratte non realistici.

Nei metodi proposti da D'Ariano et al. sono state introdotte delle procedure iterative di aggiornamento della velocità dei veicoli in funzione delle limitazioni derivanti dal segnalamento (ad esempio un segnale giallo).

La seguente figura mostra una schema della tecnica di rescheduling proposta da D'Ariano et al.: i dati di ingresso del modello sono misurati sul campo (ad esempio, le posizioni e le velocità dei veicoli) e sono utilizzati dal modello di dispaccio per rilevare i punti di conflitto assumendo i tempi di percorrenza così come definiti da orario di esercizio.

Successivamente, i conflitti vengono risolti assumendo sempre i profili di marcia dei veicoli fissati da orario cercando di ridurre la propagazione dei ritardi nella rete. Questo costituisce il problema di ottimizzazione che viene risolto applicando il metodo branch-and-bound. In particolare, ad ogni iterazione il modulo di risoluzione dei conflitti fornisce un orario di esercizio definito adottando i profili di marcia deterministici, quindi viene svolta una verifica della fattibilità di tale orario cioè si verifica che siano rispettate le distanze minime di sicurezza. Se la soluzione supera tale verifica il processo di rescheduling termina e la soluzione ottenuta è visualizzata al DCO. Altrimenti inizia una nuova iterazione che prevede la correzione dei profili di marcia e la definizione di un nuovo

orario di esercizio. La seguente figura mostra uno schema della procedura di rescheduling proposta da D'Ariano et al.:



**Figura 150.** Schema della procedura di rescheduling (D'Ariano et al., 2007)

## 5 Il modello di guida

### 5.1 Introduzione

Come descritto al capitolo 4 la letteratura sui modelli di simulazione del traffico ferroviario è, in generale, molto vasta; tuttavia, se si considera la famiglia dei modelli microscopici la gamma si riduce notevolmente e la scelta di un modello piuttosto che di un altro è comunque vincolata allo scopo dell'analisi (pianificazione di lungo, medio o breve termine, rescheduling real time). Infatti, da essa dipendono l'affidabilità attesa dei risultati e la capacità computazionale richiesta ai codici di calcolo.

L'affidabilità dei risultati dei modelli microscopici dipende, in larga misura, dal modello fisico del moto del veicolo e dal modello della logica del segnalamento.

I sistemi ferroviari tradizionali, cioè regolati dal distanziamento a blocco fisso, sono definiti sistemi a densità "controllata" in quanto la logica del blocco prevede che in ogni sezione di blocco possa esserci un solo veicolo alla volta. Per essi, l'analisi della capacità di linea segue la teoria convenzionale dei tempi di blocco (Happel, 1959) ed il passaggio da una condizione di deflusso libero ad una di deflusso congestionato è segnato dall'insorgere di conflittualità nell'allocatione delle sezioni di blocco (cd. punti di conflitto) da parte dei convogli.

Se il sistema è rappresentato attraverso un modello microscopico il regime di deflusso libero è caratterizzato dalla possibilità dei convogli di attuare velocità di marcia corrispondenti a quelle definite dall'orario di esercizio, mentre il regime di deflusso condizionato è caratterizzato dalla presenza di rallentamenti o arresti non programmati: ad esempio, un convoglio è costretto a rallentare perché trova un segnale giallo o rosso; ciò significa che intende allocare una sezione di blocco che è ancora impegnata da un altro convoglio).

Nei sistemi ferroviari regolati dal distanziamento a blocco fisso le condizioni operative di flusso ininterrotto possono essere paragonate a quelle del traffico stradale e, pertanto, i regimi di deflusso (libero, congestionato, instabile) sono caratterizzati a livello microscopico dal diverso grado di condizionamento a cui è soggetto un convoglio nell'attuazione della velocità massima operativa a causa della posizione e velocità effettiva del veicolo che lo precede. Se, quindi, ad esempio, in condizioni di deflusso libero un convoglio tende a raggiungere ed a conservare la velocità massima operativa imposta dai vincoli statici (velocità civili), in condizioni di deflusso congestionato sarà impegnato ad accodarsi al veicolo che lo precede mantenendo una distanza di sicurezza.

A valle di queste considerazioni, è possibile affermare che la maggior parte dei modelli microscopici sviluppati sino ad oggi risultano inadeguati a riprodurre, con la stessa accuratezza, il moto fisico dei convogli nei due diversi regimi di distanziamento (blocco fisso, blocco mobile).



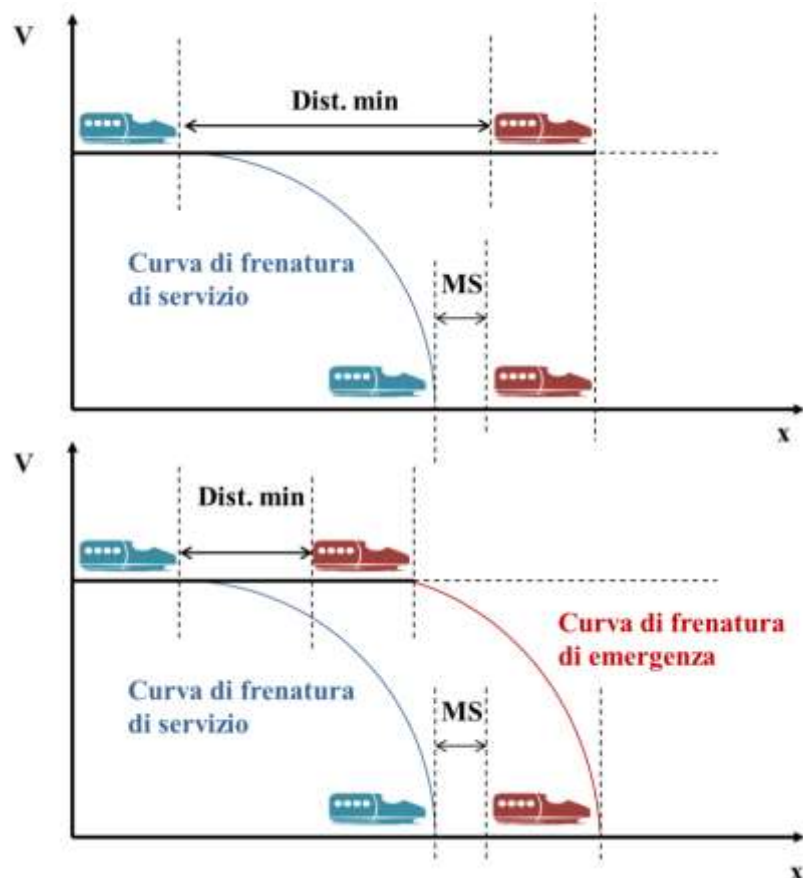
Inoltre, come già ampiamente descritto nei precedenti capitoli, il distanziamento con blocco mobile, che prevede che la lunghezza delle sezioni di blocco sia nulla e che il punto di arresto (segnale rosso) coincida con la posizione della coda del veicolo leader a meno di un margine di sicurezza, possa essere realizzato in due diversi regimi: hard wall e soft wall.

Il regime “hard wall” (detto anche “blocco mobile assoluto”) assume che, nel generico istante  $t$ , il veicolo leader abbia una decelerazione infinita e che, quindi, si arresti istantaneamente. Ciò equivale a dire che, per il veicolo follower, l’inizio del blocco nel generico istante  $t$ , cioè la posizione del segnale di arresto (segnale rosso), coincide con la posizione della coda del leader al tempo  $t$ . Pertanto, il follower deve disporre di una distanza libera a valle pari almeno alla distanza necessaria per arrestarsi calcolata a partire dalla velocità massima operativa di tratta ed in funzione della sua capacità frenante.

Il regime “soft wall” (detto anche “blocco mobile relativo”) assume, invece, che, nel generico istante  $t$ ,

il veicolo leader decelererà con un certo tasso, percorrendo un certo spazio di frenatura  $x_L^*$  in un certo periodo di frenatura  $t_L^*$ . Ciò equivale a dire che, per il veicolo follower, l’inizio del blocco nel generico istante  $t$ , cioè la posizione del segnale di arresto (segnale rosso), coincide con la posizione della coda del leader al tempo  $t + t_L^*$ . Pertanto, il follower deve disporre di una distanza libera a valle minore della distanza necessaria ad arrestarsi.

Pertanto, nel caso di blocco mobile assoluto, il distanziamento minimo teorico tra due convogli è pari alla distanza di arresto del veicolo follower; nel caso di blocco mobile relativo, invece, il distanziamento minimo teorico è pari alla differenza tra lo spazio di arresto del leader e quello del follower:



**Figura 151. Distanza minima di sicurezza con blocco mobile assoluto e blocco mobile relativo**

Il comportamento alla guida del macchinista, o analogamente il funzionamento di un sistema ATO, in caso di blocco mobile risulta per alcuni aspetti molto simile a quello del guidatore di un veicolo stradale: il moto del veicolo follower è direttamente condizionato da quello del veicolo leader. Partendo da questa semplice intuizione si è pensato che la vasta trattazione sui modelli di simulazione delle correnti di traffico stradale potesse fornire validi suggerimenti per sviluppare un modello microscopico di simulazione del traffico ferroviario regolato da distanziamento a blocco mobile.

Ad oggi non è possibile trovare in letteratura modelli che possano rappresentare in modo realistico l'inseguimento treni con blocco mobile relativo. Sicuramente, ciò è dovuto alle non poche difficoltà che si stanno incontrando per implementare su tratte reali il distanziamento con blocco mobile assoluto che rendono ancora più utopistica quella del blocco mobile relativo.

A rendere scettici sia gli operatori ferroviari che gli studiosi di settore nei confronti della possibilità di rendere operativo il blocco mobile è la consapevolezza che, allo stato attuale delle tecnologie disponibili, un tale distanziamento non garantisce i livelli di sicurezza richiesti per la circolazione ferroviaria. Infatti, per realizzare il blocco mobile è necessaria la conoscenza e la trasmissione di

una mole di informazioni maggiore rispetto al blocco mobile fisso. Infatti, ciascun convoglio deve conoscere in modo continuo nel tempo e nello spazio non solo le proprie caratteristiche cinematiche (posizione, velocità, accelerazione) e le proprie prestazioni frenanti (decelerazione massima garantita, ritardi di attuazione), ma anche quelle del veicolo che lo precede. La precisione e la disponibilità di tali informazioni è fondamentale per garantire la sicurezza di marcia, ma introduce una serie di problematiche relative agli errori odometrici, alla verifica di integrità treno ed ai ritardi di trasmissione.

Vi è poi un' ulteriore scetticismo inerente il reale beneficio in termini di incremento di capacità di linea apportato dal blocco mobile.

Infatti, gli effetti sulla capacità di linea dei sistemi ETCS (Livello 1,2 e 3) sono stati valutati attraverso simulazione di infrastrutture ideali (Verkehrswissenschaftliches Institut - Aachen, 2008), mentre non si dispone ancora di modelli relativi al blocco mobile relativo.

Tuttavia, dal momento che le limitazioni alla fattibilità del blocco mobile sono di natura tecnologica e già in via di risoluzione per il blocco mobile assoluto, si rafforza la convinzione che sia necessario definire un modello per la simulazione del traffico ferroviario con blocco mobile relativo.

Alla luce di queste considerazioni è stato sviluppato il modello di cui si fornisce la descrizione generale e la formulazione matematica nei paragrafi successivi.

I requisiti fondamentali che hanno orientato lo sviluppo del modello sono:

- il modello deve essere multi-regime, .....
- il modello deve garantire sempre l'arresto in sicurezza;
- il modello deve garantire la stabilità asintotica. sviluppato implementando i requisiti delle *System Requirements Specification 026-3.4* (ERA, 2014).

## **5.2 Architettura generale del sistema**

L'esercizio di una rete di trasporto ferroviario è il risultato di una complessa interazione tra tutte le sue componenti sia fisiche che gestionali.

Il modello di guida sviluppato è del tipo microscopico in quanto gli input relativi all'infrastruttura derivano da un grafo del tipo link-oriented in cui sono rappresentate le componenti fondamentali dell'infrastruttura (segnali luminosi, stazioni, sezioni di blocco).

Inoltre, il modello di guida è del tipo ad avanzamento ad intervalli di tempo prefissati (o a tempo discreto): ciò significa che, per ogni intervallo prefissato di simulazione è aggiornato lo stato di tutte le componenti del sistema e l'occorrenza degli eventi rispetta l'ordine di accadimento del sistema reale.

Il moto del veicolo è descritto da un modello dinamico che descrive l'interazione tra tutte le forze applicate al veicolo che è considerato come un corpo rigido (cioè un corpo continuo in cui la distanza tra una qualsiasi coppia di punti del corpo rimane invariata nel tempo e nello spazio). Le forze considerate dal modello dinamico sono quelle attive (cioè applicate dall'apparato motore e da quello frenante) e quelle passive cioè le resistenze al moto.

In generale, la schematizzazione più diffusa nei modelli di simulazione ferroviari prevede tre macro componenti principali: l'infrastruttura, il materiale rotabile e l'orario di esercizio.

Per sviluppare il modello di guida, inoltre, è necessario schematizzare anche il processo di guida del veicolo; in genere, il processo di guida di un veicolo è scomposto in tre fasi: la fase di percezione, la fase di decisione e la fase di controllo.

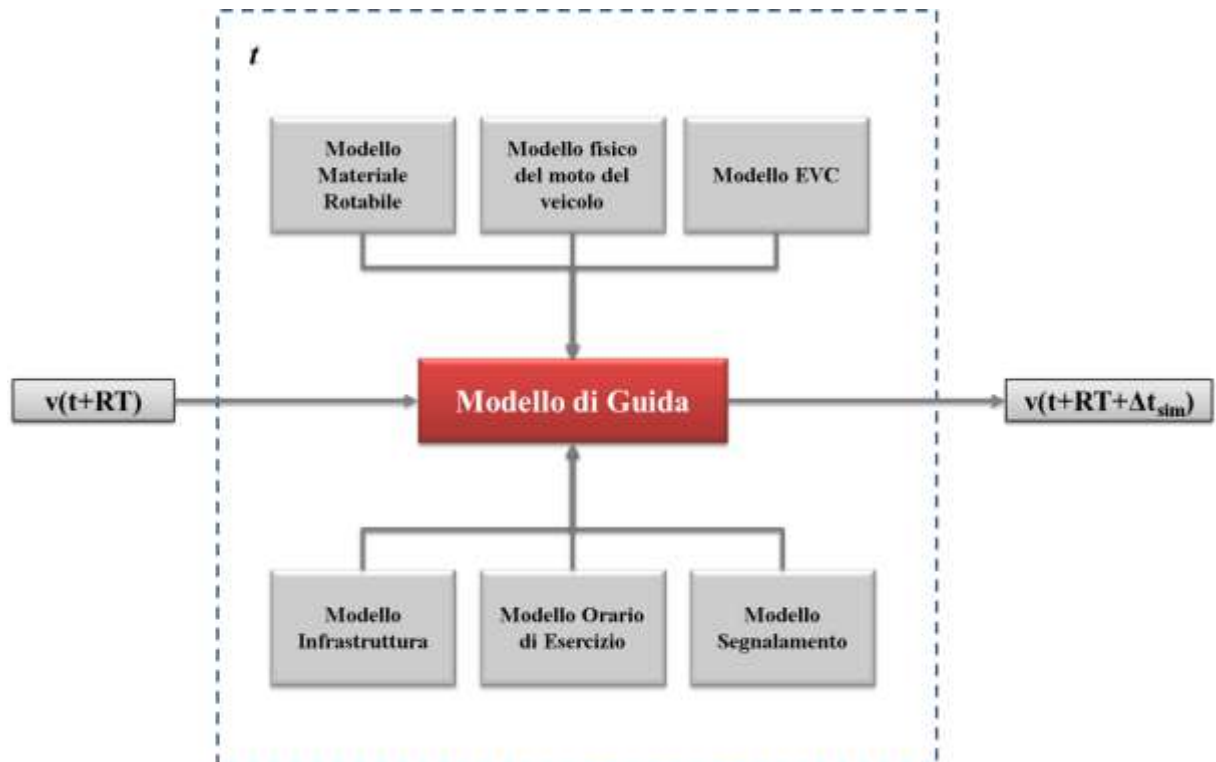
Nella fase di percezione il macchinista o un sistema ATO acquisisce gli stimoli provenienti sia dall'ambiente esterno che dall'interazione tra il veicolo e l'ambiente esterno. Ad esempio, nel caso di guida manuale con segnali luminosi a vista questa fase si caratterizza per la percezione visiva di un segnale posto a giallo; nel caso, invece, di guida semi-automatica o automatica questa fase è caratterizzata dalla captazione del sottosistema di bordo (a mezzo di antenna) del telegramma contenente la Movement Authority trasmesso dal sottosistema di terra (via transponder o via GSM-R).

Nella fase di decisione il macchinista o il sistema ATO elabora gli stimoli o le informazioni ricevuti ed elabora la strategia di guida da adottare considerando le prestazioni del convoglio, le caratteristiche del tracciato ed i vincoli di sicurezza (velocità massima civile, posizione del punto di arresto). La strategia di guida da adottare può essere del tipo "accelera", "mantieni la velocità costante" o "decelera" ed è a partire da essa che potrà essere calcolato lo stato del sistema nell'istante di simulazione successivo.

Nella fase di controllo, infine, viene attuata la strategia scelta nella fase precedente e sono monitorati con costanza gli effetti indotti dal controllo. L'inizio del controllo rappresenta, dunque, il momento in cui viene comandata l'accelerazione o la frenatura dal macchinista o dal sistema ATO.

Al fine di rendere il modello quanto più generico possibile cioè adattabile a qualsiasi caso di studio, il modello è stato strutturato partendo dalle fasi del processo di guida; per ciascuna di esse, quindi, si sono individuate le componenti del sistema interessate.

La seguente figura mostra uno schema dell'architettura generale del modello:



**Figura 152. Schema dell'architettura del modello**

Nei seguenti paragrafi sono descritti i singoli modelli e le loro interazioni.

### **5.3 Il modello del materiale rotabile**

Poiché il moto del veicolo è descritto da un modello dinamico, è necessario esplicitare sia le forze attive che quelle passive applicate al veicolo stesso. Pertanto, le prestazioni meccaniche dell'apparato motore sono descritte attraverso la Caratteristica Meccanica di Trazione (CMT) del veicolo ottenuta dalla Caratteristica Meccanica del motore e dal vincolo di aderenza. La CMT consente di ricavare il massimo sforzo di trazione applicabile in funzione della potenza del motore e delle condizioni di aderenza nell'area di contatto ruota-rotaia.

Invece, per il calcolo delle resistenze al moto è necessario conoscere: il tipo di convoglio (passeggeri, merci, a potenza concentrata/distribuita), la massa totale, il coefficiente delle masse rotanti, il numero di carrozze, il numero di assi, l'area della sezione frontale del veicolo (*sezione maestra*), la forma aerodinamica del veicolo (numero di rientranze/sporgenze, uniformità del fondo, ecc.). Tali caratteristiche sono indispensabili per scegliere le espressioni più appropriate tra le molteplici disponibili in letteratura e per calibrare i relativi parametri.

Per la verifica di occupazione/liberazione delle tratte e di integrità del convoglio è necessario, naturalmente, conoscere la lunghezza totale del veicolo.

Infine, per modellare la fase di frenatura è necessario conoscere la percentuale di massa frenata. La seguente tabella riassume tutti i dati del modello di guida riferiti al materiale rotabile:

ID Materiale Rotabile	Lunghezza [m]	Massa [ton]	Velocità Massima [km/h]	Coeff. Masse Rotanti [-]	Percentuale Massa Frenata [%]	Profilo altimetrico corretto		Modello decelerazione di emergenza		Modello decelerazione di servizio	
ETR_400	102	140	120	1,1	130	<i>Prog</i> [m]	<i>i</i> [-]	<i>V</i> [km/h]	<i>d</i> [m/s <sup>2</sup> ]	<i>V</i> [km/h]	<i>d</i> [m/s <sup>2</sup> ]
						0	0	0	-1,05	0	-0,662
						...	...	...	...	...	...
						19900	0.05	200	-0,748	200	-0,741

**Tabella 4. Struttura dati modello materiale rotabile**

Inoltre, come previsto dallo standard ETCS, ai fini del calcolo della decelerazione complessiva applicata al convoglio, è necessario definire il modello dell'accelerazione indotta dalla pendenza del tracciato  $a_{pendenza}$  che deve essere compensata con la lunghezza reale del veicolo, modellato come corpo rigido, e dell'inerzia concernente le masse rotanti.

Pertanto, il modello del materiale rotabile, oltre a contenere sostanzialmente tutti i dati di input relativi alle caratteristiche fisico-prestazionali del veicolo, fornisce come output la funzione  $a_{pendenza}=a_{pendenza}(x)$  cioè il profilo altimetrico corretto e relativo allo specifico materiale rotabile.

#### 5.4 Il modello dell'EVC

Il modello dell'European Vital Computer fornisce come dato di uscita il tempo di reazione del sistema di guida ( $RT$ ). Tale tempo di reazione è costituito da diverse aliquote relative al computer di bordo (EVC), al macchinista, all'apparato motore e all'apparato frenante (si veda il capitolo 3). Il Reaction Time è indipendente dal livello operativo ETCS in quanto dipende solo dal tipo di materiale rotabile e da valori fissati da norma. La seguente tabella riassume le aliquote che compongono il tempo di reazione del sistema di guida:

ID Materiale Rotabile	Aliquote RT	Valore [s]	
ETR_400	<i>T_PreIndication</i>	7	<i>Fixed Value</i>
	<i>T_driver</i>	4	<i>Fixed Value</i>
	<i>T_bs</i>	$T_{bs} = T_{bs}(L_{treno}, V_{target})$	Calcolato
	<i>T_Indication</i>	$T_{Indication} = T_{Indication}(T_{bs})$	Calcolato

**Tabella 5. Aliquote del tempo di reazione del sistema di guida**

## 5.5 Il modello dell'infrastruttura

Il modello di infrastruttura riproduce le caratteristiche dell'infrastruttura; esso è costituito da un grafo del tipo link-oriented in cui per ogni arco sono specificate le caratteristiche plano-altimetriche del tracciato ferroviario, le progressive delle stazioni, le progressive dei segnali luminosi, il coefficiente di aderenza e la presenza eventuale di galleria:

Prog [m]	Velocità Civile [km/h]	Pendenza [-]	Raggio curvatura [-]	Coeff. Aderenza [-]	Galleria	Tipo nodo
0	30	0	Inf	0.3	Si	Stazione
63	30	0	Inf	0.3	Si	Linea
137	30	0	Inf	0.3	Si	Segnale
...	...	...	...	...	...	...

**Tabella 6. Struttura dati del modello infrastruttura**

## 5.6 Il modello dell'orario di esercizio

Il modello dell'orario di esercizio associa a ciascuna stazione (la cui progressiva è fornita dal modello dell'infrastruttura) l'orario di partenza ed il tempo di attesa e restituisce come dato in uscita l'eventuale ritardo maturato dalla generica corsa in ciascuna stazione. La seguente tabella mostra un esempio dei dati di input/output del modello:

ID Stazione	Orario di partenza	Tempo di attesa [s]	Ritardo [s]
<i>MS-TG 1</i>	08:10:00	30	0
<i>MS-TG 2</i>	08:20:00	40	10
...	...	...	...

**Tabella 7. Esempio di struttura dei dati del modello dell'orario di esercizio**

## 5.7 Il modello del segnalamento

Il modello del segnalamento riceve come dati in ingresso le posizioni di tutti i veicoli presenti sulla linea nel generico istante  $t$  di simulazione e fornisce come dato in uscita lo stato dei segnali luminosi o, più in generale, la posizione dell'EoA.

In tale modello sono riprodotte tutte le funzionalità del sistema di Automatic Train Protection: rilevamento posizione veicoli, verifica integrità convogli, aggiornamento stato segnali e/o trasmissione della Movement Authority a ciascun veicolo.

Come più volte sottolineato, un aspetto cruciale per la sicurezza della circolazione ferroviaria è la tempestività con cui sono trasmesse le informazioni dai dispositivi di terra a quelli di bordo. Infatti, nel modello del segnalamento sono considerati anche i ritardi di trasmissione ed elaborazione delle componenti tecnologiche utilizzate nel sistema di segnalamento.

Il ritardo complessivo che determina l'obsolescenza dell'EoA trasmessa a ciascun veicolo dipende dal sistema di segnalamento adottato.

Nel caso di sistemi ETCS il valore di tale ritardo risulta (si veda il capitolo 3):

Componenti ETCS L1	Tempo reazione medio [s]
LEU	0,7
EVC + MMI	1
<b><math>\delta</math></b>	<b>1,7</b>

Componenti ETCS L2	Tempo reazione medio [s]
IXL $\rightarrow$ RBC	0,05
RBC	1,5
RBC $\rightarrow$ Treno	1,1
EVC + MMI	1
<b><math>\delta</math></b>	<b>3,65</b>

Componenti ETCS L3	Tempo reazione medio [s]
Integrità treno	4
Treno $\rightarrow$ RBC	1,1
RBC	1,5
RBC $\rightarrow$ Treno	1,1
EVC + MMI	1
<b><math>\delta</math></b>	<b>8,7</b>

### 1.1. Il modello fisico del moto del veicolo

Il modello fisico del moto del veicolo ha come dati in ingresso la posizione, la velocità e l'accelerazione del generico veicolo all'istante  $t$  e fornisce come dati in uscita la posizione, la velocità e l'accelerazione del veicolo all'istante  $t + \Delta t_{sim}$  cioè dopo uno step di simulazione; lo step di simulazione è discretizzato in di step di calcolo  $\Delta t_{calc}$  dove  $\Delta t_{calc}$  rappresenta il passo scelto per l'integrazione delle funzioni cinematiche applicando il metodo delle differenze finite. Ovviamente



tanto più piccolo è il passo scelto per l'integrazione tanto più accurati saranno i risultati ottenuti. Tale valore rappresenta, quindi, un parametro di settaggio generale della simulazione.

Il modello fisico del moto si basa sia sull'equazione fondamentale della trazione, in quanto sono considerate tutte le forze applicate al veicolo in ogni fase del moto, che sulla legge oraria del moto.

Gli step di calcolo previsti dal modello sono:

Caso I: strategia di guida "accelerazione".

$$v_{max} = \min\{V_{max,treno}, V_{SSP}(x(t - \Delta t_{calc}))\}$$

$$se \quad t_0 + \Delta t_{sim} \leq \frac{a_{max}^{comfort}}{j_{in}^{acc}}$$

$$j(t) = j_{in}^{acc}$$

$$a_{jerk}(t) = j_{in}^{acc} \cdot \Delta t_{calc}$$

$$v_{jerk}(t) = [a_{jerk}(t - \Delta t_{calc}) + a_{jerk}(t)] \cdot \frac{\Delta t_{calc}}{2}$$

$$altrimenti \quad se \quad t_0 + \Delta t_{sim} \leq \frac{v_{max}}{a_{max}^{comfort}} - \frac{a_{max}^{comfort}}{j_{in}^{acc}}$$

$$j(t) = 0$$

$$a_{jerk}(t) = a_{max}^{comfort}$$

$$v_{jerk}(t) = v(t - \Delta t_{calc}) + a_{max}^{comfort} \cdot \Delta t_{calc}$$

$$altrimenti \quad se \quad t_0 + \Delta t_{sim} \leq \frac{a_{max}^{comfort}}{j_{fin}^{acc}}$$

$$j(t) = -j_{fin}^{acc}$$

$$a_{jerk}(t) = a_{max}^{comfort} - j_{fin}^{acc} \cdot \Delta t_{calc}$$

$$v_{jerk}(t) = [a_{jerk}(t - \Delta t_{calc}) + a_{jerk}(t)] \cdot \frac{\Delta t_{calc}}{2}$$

*fine*

$$A(x(t - \Delta t_{calc})) = f_a((x(t - \Delta t_{calc})) \cdot P_{ad}$$

$$T_{motore}((v(t - \Delta t_{calc})) = CMT((v(t - \Delta t_{calc})))$$

$$T((v(t - \Delta t_{calc})) = \min\{T_{motore}((v(t - \Delta t_{calc}))), A(x(t - \Delta t_{calc}))\}$$

$$R(x(t - \Delta t_{calc}), v(t - \Delta t_{calc})) = R_{ordinarie}(v(t - \Delta t_{calc})) + R_{pendenza}(x(t - \Delta t_{calc})) + R_{curva}(x(t - \Delta t_{calc})) + R_{galleria}(x(t - \Delta t_{calc}), v(t - \Delta t_{calc}))$$

$$a_{trazione}(t) = \frac{T((v(t - \Delta t_{calc})) + R(x(t - \Delta t_{calc}), v(t - \Delta t_{calc})))}{\beta(x(t - \Delta t_{calc})) \cdot P}$$

$$v_{trazione}(t) = [a_{trazione}(t - \Delta t_{calc}) + a_{trazione}(t)] \cdot \frac{\Delta t_{calc}}{2}$$

$$v(t) = \min\{V_{max, treno}, V_{SSP}(x(t - \Delta t_{calc})), v_{jerk}(t), v_{trazione}(t)\}$$

$$x(t) = x(t - \Delta t_{calc}) + [v(t) + v(t - \Delta t_{calc})] \cdot \frac{\Delta t_{calc}}{2}$$

$$x_{acc}(t_0 + \Delta t_{sim}) = \sum_{i=1}^m x(t_i) \quad \text{con} \quad m = \frac{\Delta t_{sim}}{\Delta t_{calc}}$$

Caso II: strategia di guida “regime”

$$j(t) = 0$$

$$a_{jerk}(t) = 0$$

$$v(t) = \min\{V_{max, treno}, V_{SSP}(x(t - \Delta t_{calc}))\}$$

$$x(t) = x(t - \Delta t_{calc}) + v(t) \cdot \Delta t_{calc}$$

$$x_{reg}(t_0 + \Delta t_{sim}) = \sum_{i=1}^m x(t_i) \quad \text{con} \quad m = \frac{\Delta t_{sim}}{\Delta t_{calc}}$$

Caso III: strategia di guida “decelerazione”

$$v_{max} = \min\{V_{max, treno}, V_{SSP}(x(t - \Delta t_{calc}))\}$$

$$\text{se } t_0 + \Delta t_{sim} \leq \frac{d_{max}^{comfort}}{j_{in}^{dec}}$$

$$j(t) = -j_{in}^{dec}$$

$$a_{jerk}(t) = -j_{in}^{dec} \cdot \Delta t_{calc}$$

$$v_{jerk}(t) = v(t - \Delta t_{calc}) - [a_{jerk}(t - \Delta t_{calc}) + a_{jerk}(t)] \cdot \frac{\Delta t_{calc}}{2}$$

$$\text{altrimenti se } t_0 + \Delta t_{sim} \leq \frac{v_{max}}{d_{max}^{comfort}} - \frac{d_{max}^{comfort}}{j_{in}^{dec}}$$

$$j(t) = 0$$

$$a_{jerk}(t) = -d_{max}^{comfort}$$

$$v_{jerk}(t) = v(t - \Delta t_{calc}) + a_{max}^{comfort} \cdot \Delta t_{calc}$$

$$\text{altrimenti se } t_0 + \Delta t_{sim} \leq \frac{d_{max}^{comfort}}{j_{fin}^{dec}}$$

$$j(t) = j_{fin}^{dec}$$

$$a_{jerk}(t) = -d_{max}^{comfort} + j_{fin}^{dec} \cdot \Delta t_{calc}$$

$$v_{jerk}(t) = v(t - \Delta t_{calc}) - [a_{jerk}(t - \Delta t_{calc}) + a_{jerk}(t)] \cdot \frac{\Delta t_{calc}}{2}$$

*fine*

$$A(x(t - \Delta t_{calc})) = f_a((x(t - \Delta t_{calc})) \cdot P_{ad}$$

$$\Phi_{freno}((v(t - \Delta t_{calc})) = CMF((v(t - \Delta t_{calc})))$$

$$\Phi((v(t - \Delta t_{calc})) = \min\{\Phi_{freno}((v(t - \Delta t_{calc}))), A(x(t - \Delta t_{calc}))\}$$

$$R(x(t - \Delta t_{calc}), v(t - \Delta t_{calc})) = R_{ordinarie}(v(t - \Delta t_{calc})) + R_{pendenza}(x(t - \Delta t_{calc})) + R_{curva}(x(t - \Delta t_{calc})) + R_{galleria}(x(t - \Delta t_{calc}), v(t - \Delta t_{calc}))$$

$$a_{freno}(t) = \frac{\Phi((v(t - \Delta t_{calc})) + R(x(t - \Delta t_{calc}), v(t - \Delta t_{calc})))}{\beta(x(t - \Delta t_{calc})) \cdot P}$$

$$v_{freno}(t) = [a_{freno}(t - \Delta t_{calc}) + a_{freno}(t)] \cdot \frac{\Delta t_{calc}}{2}$$

$$v(t) = \min\{V_{max,treno}, V_{SSP}(x(t - \Delta t_{calc})), v_{jerk}(t), v_{trazione}(t)\}$$

$$x(t) = x(t - \Delta t_{calc}) + [v(t) + v(t - \Delta t_{calc})] \cdot \frac{\Delta t_{calc}}{2}$$

$$x_{dec}(t_0 + \Delta t_{sim}) = \sum_{i=1}^m x(t_i) \quad \text{con} \quad m = \frac{\Delta t_{sim}}{\Delta t_{calc}}$$

## 5.8 Il modello di guida

Nel settore del trasporto stradale i modelli applicati per studiare l'interazione longitudinale tra i veicoli di una corrente di traffico sono definiti *modelli di car-following*.

Un modello di car following mira a descrivere il comportamento aggregato di una corrente di traffico (cioè a livello macroscopico) attraverso l'analisi del moto del singolo veicolo (cioè a livello microscopico). Nel settore del trasporto stradale, infatti, tali modelli sono implementati nei codici di simulazione e sono applicati sia per lo sviluppo delle tecnologie degli Intelligent Transportation Systems (ITS) che per lo sviluppo dei sistemi di controllo in sicurezza dei veicoli.

Una prima distinzione dei modelli di car following si basa sulla *stabilità* sia locale che asintotica del modello; nella teoria del car following si definiscono:

- *stabilità locale* del modello come l'attitudine a ripristinare nel tempo le condizioni di moto di un veicolo follower antecedenti all'azione di disturbo nella velocità del veicolo leader;
- *stabilità asintotica* del modello come l'attitudine a smorzare la propagazione di un disturbo in accelerazione del veicolo capofila di un plotone di veicoli.

Quindi, un modello di car following può essere instabile oppure garantire solo un tipo di stabilità oppure garantire entrambe.

Un ulteriore criterio di classificazione dei modelli di car following si basa sulle assunzioni poste alla base del modello. In base a tale criterio, i modelli di car-following sono distinti in:

- modelli del tipo “stimolo-risposta” (Gazis-Herman-Rothery, General Motors, ed altri);
- modelli “anti-collisione” (Kometani e Sasaki, Gipps, UKDoTs SISTM, ed altri);
- modelli lineari (Helly);
- modelli “dell'istante d'azione” (MISSION, AS, PARAMICS-CM);
- modelli basati sulla logica Fuzzy (Kikuchi e Chakroborty).

La struttura generale dei modelli del tipo “stimolo-risposta” è del tipo:

$$Risposta(t + \tau) = Sensibilità \cdot Stimolo(t).$$

Questa semplice formulazione di base cerca di interpretare il complesso fenomeno di interazione tra due veicoli successivi e si basa su due principi: il veicolo che segue (follower) cerca di mantenersi alla distanza minore dal veicolo che lo precede (leader); il veicolo leader cerca di mantenere, comunque, un distanziamento tale da evitare la collisione anche nel caso in cui il leader inizi a frenare bruscamente. Numerosi studi di settore hanno tuttavia dimostrato che la struttura del tipo “stimolo-risposta” non si presta a catturare in modo esaustivo le complesse dinamiche di interazione tra i veicoli.

I modelli “anti-collisione”, invece, cercano di specificare un distanziamento di sicurezza al di sotto del quale sarebbe inevitabile la collisione nel caso in cui il veicolo leader iniziasse a frenare bruscamente. Tali modelli riescono a simulare in maniera sufficientemente realistica il comportamento aggregato del traffico. Inoltre, possono essere calibrati usando assunzioni di senso comune sul comportamento del guidatore.

I modelli lineari definiscono l'adattamento della decelerazione del veicolo follower in funzione delle frenature non solo del veicolo leader, ma anche di quello ancora prima.

I modelli dell'istante d'azione si basano sul concetto che i guidatori siano in grado di riconoscere un avvicinamento al veicolo che precede soprattutto grazie alla variazione della dimensione apparente del veicolo stesso. La decelerazione di un veicolo follower è, pertanto, legata proprio alla

capacità di percepire una differenza di velocità con il veicolo leader attraverso la variazione di dimensione apparente del veicolo leader.

I modelli basati sulla logica Fuzzy, infine, le regole comportamentali del guidatore sono la conduzione del veicolo in sicurezza ed altre dettate dall'esperienza pratica accumulata. La logica Fuzzy consente di definire tali regole comportamentali utilizzando variabili di tipo linguistico combinate in proposizioni logiche per le quali non esistono dei limiti rigidi di applicabilità (ad esempio “accelerare se il veicolo che precede accelera”).

Tra i numerosi modelli di car following del tipo “anti collisione” sviluppati negli anni, uno in particolare non solo risponde a queste due requisiti, ma si presta anche ad essere facilmente implementato nei modelli di simulazione microscopica del traffico ferroviario ed è il modello di Gipps.

Il modello di Gipps (Gipps, 1981) è un modello “anti-collisione” multi-regime: esso, infatti, descrive le dinamiche di interazione tra i veicoli di una corrente sia in condizioni di deflusso libero che in condizioni di deflusso congestionato. Se le caratteristiche della corrente veicolare (densità, portata e velocità media) sono tali da realizzare una condizione di deflusso libero significa che un veicolo è libero di raggiungere la velocità desiderata, mentre in condizioni di deflusso congestionato un veicolo segue quello che lo precede mantenendo una distanza di sicurezza cioè garantendosi l'arresto in sicurezza.

Nel caso di deflusso libero, detto  $\tau$  il tempo di reazione (supposto uguale per tutti i veicoli) posto uguale allo step di avanzamento della simulazione, e detto  $t$  il generico istante di simulazione, la velocità del follower pianificata per l'istante successivo è ricavata da una disequazione di origine sperimentale cioè costruita a partire dall'involuppo di diagrammi sperimentali velocità-accelerazione istantanee ed applicando i due seguenti vincoli:

- la velocità deve essere sempre non superiore alla velocità desiderata dal conducente:
- l'accelerazione libera decresce all'aumentare della velocità fino ad azzerarsi quando è raggiunta la velocità desiderata.

In condizioni di deflusso libero, allora, la velocità pianificata risponde alla logica di raggiungimento della velocità desiderata e l'espressione ricavata da Gipps risulta:

$$v_n(t + \tau) \leq v_n(t) + 2,5 \cdot a_n \cdot \tau \cdot \left(1 - \frac{v_n(t)}{v_n}\right) \cdot \sqrt{0.025 + \frac{v_n(t)}{v_n}}$$

in cui:

$v_n(t+\tau)$  è la velocità del veicolo follower ( $n$ ) all'istante ( $t+\tau$ );

$v_n(t)$  è la velocità del veicolo  $n$  all'istante  $t$ ;

$\tau$  è il tempo di reazione del guidatore cioè il tempo che trascorre tra la percezione dello stimolo e l'attuazione del controllo;

$a_n$  è l'accelerazione massima che il guidatore n-esimo desidera adottare;

$V_n$  è la velocità desiderata dal conducente del veicolo n-esimo.

In condizioni di deflusso congestionato, invece, la velocità pianificata nell'istante  $(t+\tau)$  risponde ad una logica di sicurezza cioè è quella velocità che consentirebbe al veicolo follower di arrestarsi anche nel caso di una frenata di emergenza del veicolo leader. Il vincolo di arresto in sicurezza è definito come:

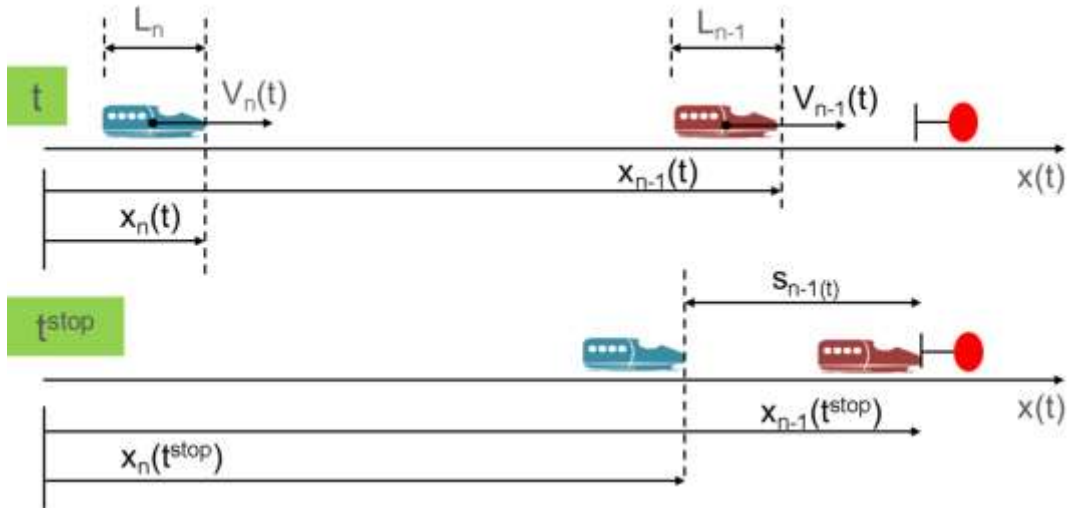
$$x_n^{stop} \leq x_{n-1}^{stop} - s_{n-1} \quad (1)$$

in cui:

$x_n^{stop}$  è la posizione della testa del follower al termine della frenatura;

$x_{n-1}^{stop}$  è la posizione della testa del leader al termine della frenatura;

$s_{n-1}$  è il reale ingombro del veicolo leader pari alla somma della lunghezza del veicolo  $n-1$  e di un margine di spazio che il veicolo follower non vuole invadere anche da fermo.



**Figura 153. Schema di arresto in sicurezza del modello di Gipps**

Gli spazi di arresto del leader e del follower risultano pari a:

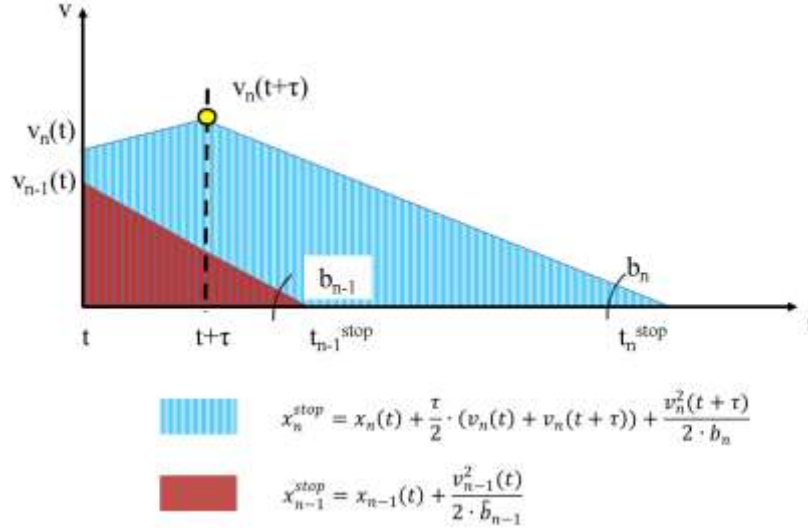
$$x_{n-1}^{stop} = x_{n-1}(t) + \frac{v_{n-1}^2(t)}{2 \cdot b_{n-1}} \quad (2)$$

$$x_n^{stop} = x_n(t) + \frac{\tau}{2} \cdot (v_n(t) + v_n(t + \tau)) + \frac{v_n^2(t + \tau)}{2 \cdot b_n} \quad (3)$$

in cui:

$b_n$  è la decelerazione massima che il guidatore del veicolo follower desidera adottare;

$\hat{b}_{n-1}$  è la stima del valore reale di  $b_{n-1}$  fatta dal guidatore follower cioè della decelerazione massima che il guidatore leader desidera adottare;  
 $\tau$  è il tempo di reazione del guidatore follower.



**Figura 154. Spazi di arresto secondo il modello di Gipps**

Sostituendo la (2) e la (3) nella (1) si ottiene una disequazione di 2° grado nell'incognita  $v_n(t+\tau)$  che fornisce l'espressione:

$$v_n(t + \tau) = -|b_n| \cdot \left[ \left( \frac{\tau}{2} + \theta \right) + \sqrt{\left( \frac{\tau}{2} + \theta \right)^2 - \frac{2}{|b_n|} \cdot \left( \frac{v_n(t) \cdot \tau}{2} - \frac{v_{n-1}^2(t)}{2 \cdot |\hat{b}_{n-1}|} + x_n(t) - (x_{n-1}(t) - s_{n-1}) \right)} \right]$$

Il modello di Gipps ammette sempre una soluzione cioè che esiste sempre un valore della velocità del follower all'istante di simulazione  $(t+\tau)$  che non provoca la collisione tra i veicoli se sussistono le seguenti condizioni:

- il parametro  $\theta$  è posto uguale a  $\frac{\tau}{2}$  ed ha il significato fisico di un tempo di reazione di sicurezza;
- $\hat{b}_{n-1} < b_{n-1}$ .

Il modello per il blocco mobile relativo è stato sviluppato, dunque, partendo dall'idea di base del modello di Gipps cioè che in ogni istante di simulazione ogni veicolo adotti una velocità che gli

consenta sempre l'arresto in sicurezza anche se il veicolo che lo precede inizia una decelerazione improvvisa (di emergenza).

Tuttavia, le ipotesi semplificative alla base del modello di Gipps, giustificate per le analisi delle correnti di traffico stradale, non possono essere accettate anche nell'ambito della simulazione del traffico ferroviario.

La prima ipotesi ad essere rimossa nello sviluppo del nuovo modello è quella della costanza dei valori dei tassi di decelerazione nel corso della manovra di arresto. Sarebbe, infatti, eccessivamente approssimativo assumere un unico valore costante per l'intera fase di arresto (del leader e del follower) in quanto la decelerazione imposta al veicolo dall'apparato frenante è fortemente condizionata dal contributo fornito dalla pendenza del tracciato che può tanto essere a favore dell'arresto, tanto incrementare la distanza di arresto operando a favore del moto.

Lo stesso equivale se si considera la cinematica del veicolo follower nel periodo di reazione  $\tau$  : infatti, ai fini del calcolo della curve di frenatura (di servizio e di emergenza) secondo lo standard ERTMS/ETCS tempo di reazione del sottosistema di bordo assume valori decisamente maggiori di quelli ragionevolmente assunti per il guidatore follower di Gipps.

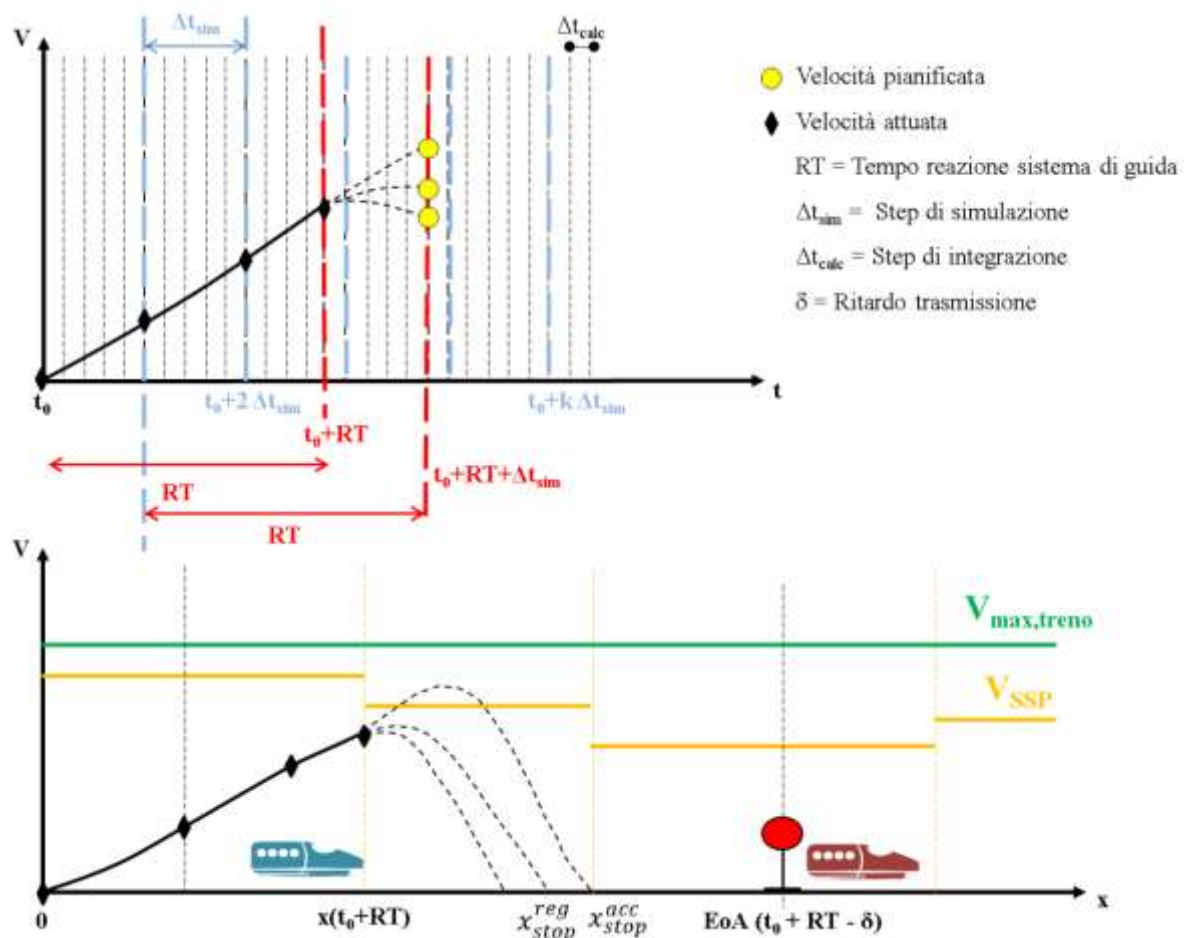
Non solo, è necessario anche considerare il valore di pendenza compensato con la lunghezza reale del convoglio ferroviario: infatti, come prescritto dallo standard ERTMS/ETCS ai fini del calcolo delle curve di frenatura (di servizio e di emergenza) è obbligatorio considerare il valore più sfavorevole per la frenatura tra quelli delle livellette altimetriche occupate dall'intero ingombro del convoglio.

Ciò equivale a dire che i parametri del modello di Gipps ( $a_{max}$ ,  $d_{max}$ ,  $\hat{b}_{n-1}$ ) diventano dei modelli di accelerazione e decelerazione funzioni dello spazio e della velocità e che non è possibile calcolare in modo esplicito sia lo spazio di arresto del leader che quello del follower.

Inoltre, per avere un modello di guida che fornisca risultati precisi è necessario considerare il contributo delle resistenze al moto non solo in fase di avviamento, ma anche in fase di regime e di frenatura; è indispensabile, cioè, che il modello sia anche dinamico.

La seguente immagine descrive la struttura temporale del processo di guida:





**Figura 155. Scansione temporale del processo di guida**

in cui:

$t_0$  è l'istante iniziale della generica corsa pianificata da orario di esercizio;

RT è il tempo di reazione del sistema di guida che include: i tempi di elaborazione dell'EVC, i tempi di attuazione dell'apparato motore/frenante ed il tempo di reazione del macchinista; esso rappresenta il ritardo con il quale il macchinista o l'EVC inizia ad attuare il comando di guida;

$\Delta t_{sim}$  è lo step di simulazione cioè l'intervallo di tempo durante il quale il sistema di guida elabora le informazioni acquisite nell'intervallo precedente;

$\Delta t_{calc}$  è il passo di integrazione scelto per il modello fisico del moto del veicolo;

$\delta$  è il ritardo con il quale il convoglio riceve la Movement Authority; ciò significa che in ogni step di simulazione il sistema di guida pianifica la velocità da attuare nello step di simulazione successivo utilizzando un'informazione (cioè una EoA) obsoleta di  $\delta$ ;

$V_{max,treno}$  è la velocità massima associata al tipo di materiale rotabile;

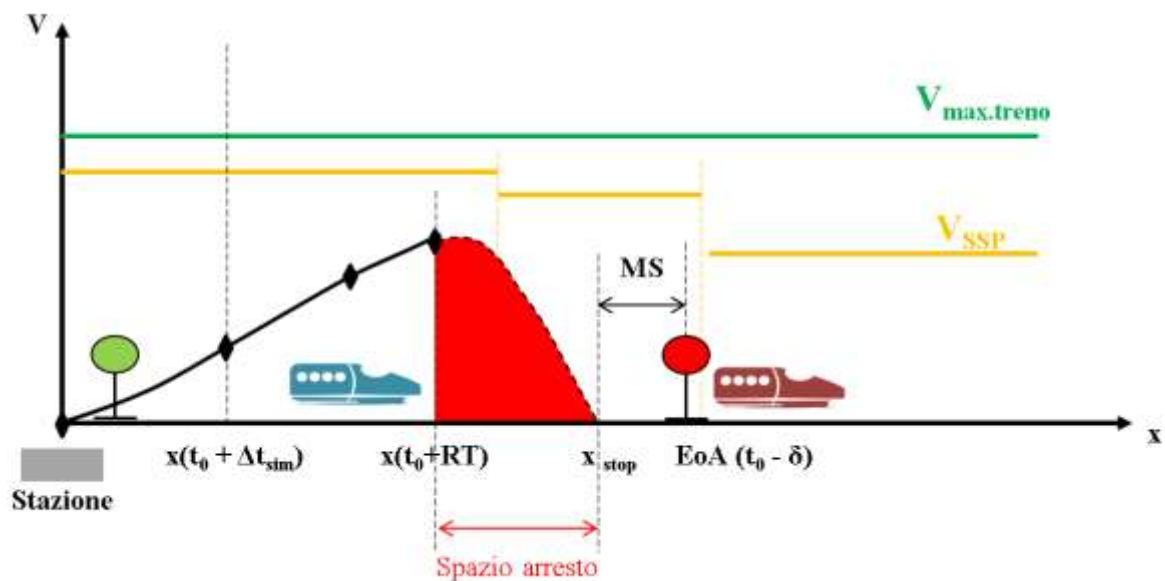
$V_{SSP}$  sono le velocità massime di tratta così come ottenute dai vincoli infrastrutturali (tratti in curva, viadotti, ecc.) cioè le cosiddette *civil speeds*.

Il modello di guida è un modello *predittivo* cioè il valore di velocità attuato in un generico istante di simulazione è frutto della previsione del moto (attraverso simulazione) svolta nell'istante di simulazione precedente. Ciò garantisce che ogni valore di velocità attuato rispetti sempre tutti i vincoli imposti che sono:

- il vincolo di velocità derivante dal materiale rotabile;
- il vincolo di velocità derivante dallo Static Speed Profile (cioè il profilo delle velocità civili funzione dello spazio);
- i vincoli relativi al comfort di marcia cioè accelerazione/decelerazione massima, contraccollo massimo iniziale/finale;
- il vincolo di arresto in sicurezza.

Questa logica garantisce che ogni valore di velocità attuato (indicato nella figura precedente con il simbolo del rombo nero) non potrà mai eccedere il valore di velocità massimo consentito per lo spazio effettivamente percorso dal convoglio in uno step di simulazione.

Detto  $t_0$  l'istante di partenza dalla generica stazione di linea, il consenso alla partenza di un convoglio (segnale di uscita stazione verde) è accordato solo dopo aver pianificato la velocità per l'istante  $t_0 + RT$ : infatti, il primo controllo sulla guida sarà possibile solo dopo il periodo  $RT$  quindi lo spazio totale pari alla somma dello spazio percorso nel tempo  $RT$  in accelerazione e lo spazio di arresto necessario a partire dal valore di velocità raggiunto al termine di  $RT$  deve essere libero da altri veicoli altrimenti il convoglio appena partito dalla stazione non riuscirebbe ad attuare il controllo in tempo utile per evitare la collisione. Se tale tratto di linea è libero il convoglio può partire dalla stazione:



**Figura 156. Processo di guida per la partenza da una stazione**

Il processo di guida appena descritto si traduce nelle seguenti condizioni:

$$\begin{aligned}
 & \text{se } \int_{t_0}^{t_0+RT} v(t)dt + \int_{t_0+RT}^{t_0+RT+t_{stop}} v(t)dt + MS \leq EoA(t_0 - \delta) \\
 & \quad v(t_0 + \Delta t_{sim}) = \min \left\{ \int_{t_0}^{\Delta t_{sim}} a(t)dt, V_{SSP}, V_{max,treno} \right\} \\
 & \text{altrimenti} \\
 & \quad v(t_0 + \Delta t_{sim}) = 0
 \end{aligned}$$

A partire dall'istante  $t_0$  il macchinista o l'ATO inizia ad accelerare cercando di raggiungere la velocità massima consentita sulla tratta. Dopo che è trascorso il primo periodo di reazione del sistema di guida, il modello di guida prevede che debba essere pianificata la velocità da attuare all'istante  $t_0+RT+ \Delta t_{sim}$ .

La fase di decisione, pertanto, prevede che venga simulata una prima strategia di guida cioè è verificato che accelerando fino all'istante  $t_0+RT+ \Delta t_{sim}$  lo spazio percorso nel periodo  $\Delta t_{sim}$  sia tale da garantire l'arresto del veicolo prima della EoA (segnale rosso) seguendo una curva di decelerazione di servizio (SBD curve); se non è verificata tale condizione, allora viene verificata la strategia con moto a regime; se neanche tale strategia garantisce l'arresto al segnale rosso significa che la velocità da attuare all'istante  $t_0+RT+ \Delta t_{sim}$  è pari alla velocità raggiunta con una decelerazione di servizio (cioè seguendo la curva SBD).

Pertanto, la fase di decisione, al fine di rispettare il tempo di percorrenza di una tratta stabilito dall'orario di esercizio e garantire al contempo un distanziamento sicuro tra i convogli, si articola nei seguenti steps:

*se*  $x_{stop}^{acc} \leq EoA(t_0 + RT - \delta)$

$$v(t_0 + RT + \Delta t_{sim}) = \min\{V_{max,treno}, V_{SSP}(x), v_{calc}^{acc}\} \quad t = t_0, \dots, (t_0 + RT + \Delta t_{sim})$$

*altrimenti se*  $x_{stop}^{reg} \leq EoA(t_0 + RT - \delta)$

$$v(t_0 + RT + \Delta t_{sim}) = \min\{V_{max,treno}, V_{SSP}(x), v_{calc}^{reg}\} \quad t = t_0, \dots, (t_0 + RT + \Delta t_{sim})$$

*altrimenti*

$$v(t_0 + RT + \Delta t_{sim}) = \min\{V_{max,treno}, V_{SSP}(x), v_{calc}^{SBD}\} \quad t = t_0, \dots, (t_0 + RT + \Delta t_{sim})$$

*fine*

in cui  $EoA(t_0+RT+\delta)$  è la progressiva del punto di arresto a valle del convoglio processato così come fornita dal modello del segnalamento,  $x_{stop}^{acc}$  è lo spazio totale percorso adottando una strategia di guida in accelerazione e verificando l'arresto in sicurezza così come fornito dal modello del moto fisico del veicolo,  $V_{max,treno}$  è la velocità massima del convoglio così come fornita dal modello del materiale rotabile,  $V_{SSP}(x)$  è il profilo delle velocità civili così come fornito dal modello di infrastruttura e le  $v_{calc}$  sono le velocità pianificate per l'istante di simulazione successivo a quello corrente con le tre diverse strategie di guida così come fornite dal modello del moto fisico del veicolo.

Le seguenti figure mostrano gli step della fase di decisione: nel caso mostrato è possibile attuare una velocità costante in quanto la velocità pianificata in accelerazione non garantisce il rispetto del vincolo sulle velocità civili:

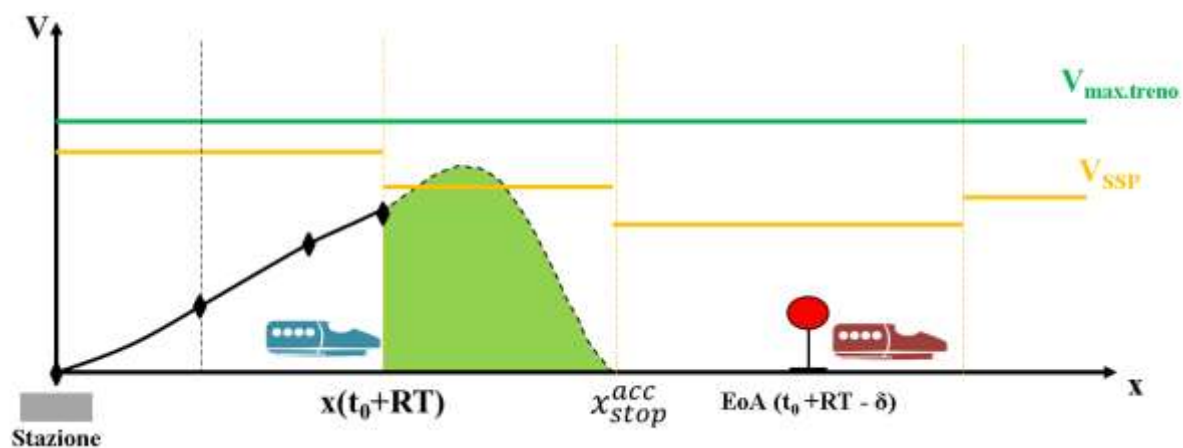


Figura 157. Verifica strategia in accelerazione

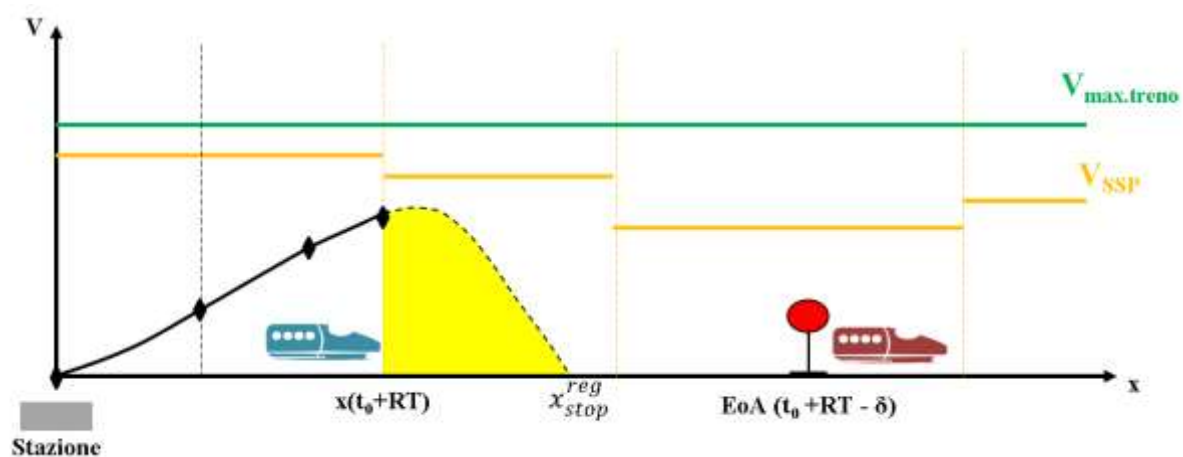


Figura 158. Verifica strategia a regime

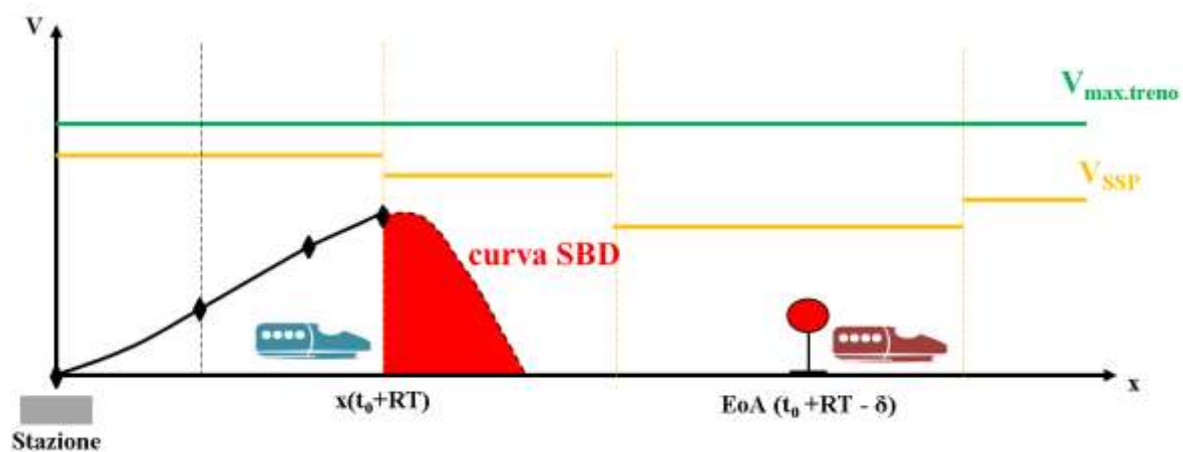


Figura 159. Strategia in decelerazione di servizio (curva SBD)

## 5.9 Applicazione del modello di guida per il calcolo della capacità di linea

Nell'ultimo decennio le aziende di trasporto su ferro hanno riscontrato un incremento del flusso di passeggeri e di merci; le ragioni che spiegano questo trend crescente della domanda di trasporto sono molteplici: il miglioramento della qualità del servizio offerto, le politiche adottate dalle amministrazioni locali (cosiddette strategie di *push and pull*), una nuova coscienza civica risvegliata dalle problematiche ambientali.

Nei periodi di punta il sovraffollamento alle banchine causa ritardi e la regolarità del servizio è spesso compromessa. Come accennato nel capitolo 1, un requisito fondamentale per la sicurezza della circolazione è proprio la regolarità del servizio. Inoltre, un servizio di trasporto non regolare è anche meno attrattivo per l'utenza. Infine, i rallentamenti e gli arresti non programmati causano maggiori consumi di energia.

Pertanto, per garantire un servizio di trasporto efficiente ed attrattivo è necessario adeguare l'offerta alla domanda. Per adeguare l'offerta alla domanda, una delle possibili soluzioni consiste nell'aumentare la frequenza delle corse e/o aumentare la capacità dei veicoli (ad esempio, raddoppiando la composizione dei convogli).

La *frequenza del servizio*  $f$  di una linea è il numero di veicoli che passano per una data stazione nella stessa direzione in un'ora.

L'*headway*  $H$  di linea per una specifica direzione di marcia è l'intervallo di tempo che trascorre tra la partenza dalla stazione terminale di un convoglio e quella del successivo (si veda il capitolo 3) considerando le condizioni di sicurezza (distanziamento minimo, occupazione sezioni di blocco).

La *capacità nominale*  $C_N$  di una linea è, invece, l'inverso del minimo headway di linea cioè il numero totale di veicoli transitati sulla linea per una certa direzione nell'unità di tempo (in genere l'ora):

$$C_N = \frac{3600}{H_{min}} \left[ \frac{\text{treni}}{h} \right]$$

Ad esempio, data la linea "Cumana", una frequenza pari a 6 treni/h per la direzione "Montesanto – Torregaveta" significa che si ha il passaggio ad una stazione di 1 treno ogni 10 minuti.

Nel caso del trasporto ferroviario la frequenza del servizio e la capacità nominale coincidono; convenzionalmente si identifica con capacità nominale il valore massimo teorico che un dato sistema riesce a fornire, mentre con frequenza quello che viene realmente offerto come servizio di trasporto.

Naturalmente, se si impone il minimo distanziamento si ottiene la frequenza massima di linea cioè il numero massimo di veicoli transitati nell'unità di tempo (generalmente l'ora) per una direzione di marcia.

Come già anticipato, sia l'incremento della frequenza che l'aumento della lunghezza dei convogli sono soluzioni che contribuiscono ad aumentare la capacità di una linea ferroviaria intesa come numero di passeggeri trasportati. Tuttavia, l'aumento della lunghezza dei convogli è spesso vincolato alla lunghezza delle banchine di stazione. Pertanto, l'incremento della frequenza è, spesso, l'unica alternativa possibile a patto che si disponga di una flotta di veicoli sufficiente a garantirla.

Tuttavia, la frequenza è vincolata al distanziamento minimo che è possibile realizzare sulla linea cioè al tipo di blocco. Quindi, per ottenere un incremento significativo della capacità di una linea è necessario riprogettare il layout delle sezioni di blocco o realizzare un ammodernamento delle tecnologie del sistema di segnalamento.

La circolazione dei convogli su una rete è un fenomeno molto complesso a causa dell'interazione tra tutte le componenti del sistema (materiale rotabile, infrastruttura, segnalamento, orario di esercizio, ecc.) e, quindi, la modellizzazione si avvale della simulazione computer-based.

Pertanto, una delle possibili applicazioni del modello di guida sviluppato è la valutazione degli effetti sulla capacità di linea di un sistema di segnalamento.

Nei paragrafi seguenti è descritta l'applicazione del modello di guida ad una linea di tipo suburbano per la valutazione dell'incremento di capacità indotto da quattro diversi sistemi di segnalamento: ETCS L1, L2 ed L3 ed ETCS L3 con approccio soft wall.

## **5.10 Il caso studio: la linea Cumana**

La linea Cumana è gestita dall'Ente Autonomo Volturno (EAV), una società a responsabilità limitata che ha come socio unico la Regione Campania. La linea collega il centro storico della città di Napoli (stazione Montesanto) con la località Torregaveta nel Comune di Bacoli. Il tracciato è lungo circa 21 km: un primo tratto attraversa il tessuto urbano di Napoli, mentre il successivo costeggia il golfo di Pozzuoli ed il lago Fusaro. L'infrastruttura è a scartamento ordinario ed a trazione elettrica. La linea Cumana serve complessivamente 14 stazioni e 4 fermate ed è completamente a doppio binario fatta eccezione per il tratto compreso tra le stazioni Bagnoli ed Arco Felice.

La gestione della circolazione avviene attraverso un regime di Dirigenza Centrale Operativa con posto centrale ubicato nella stazione Montesanto. Sulla linea vige il distanziamento a blocco fisso. Tutte le stazioni e le fermate sono attrezzate con ACEI che realizzano la formazione e la distruzione degli itinerari in modo automatico.

Il sistema di segnalamento sulla linea Cumana prevede tre diversi impianti interagenti tra loro:

- Telecomando;

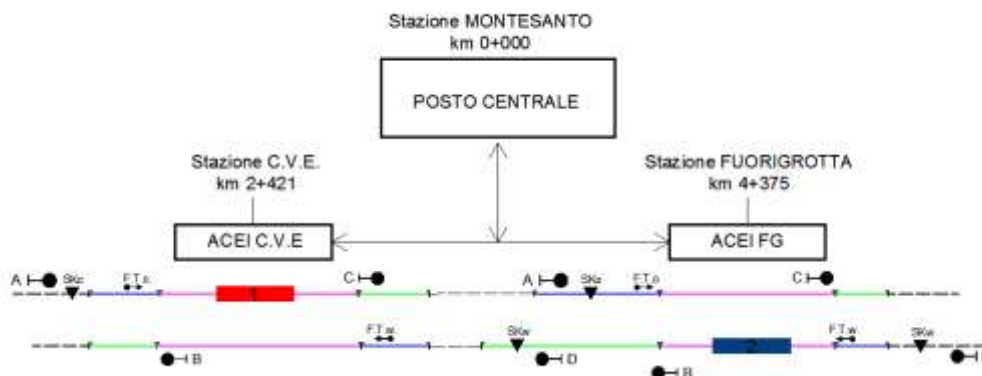
- Blocco Elettrico Centralizzato (BEC);
- Apparati Centrali Elettrici a pulsanti di Itinerari (ACEI).

Il Telecomando è l'impianto che consente il comando a distanza degli enti di piazzale ed è costituito da raggruppamenti di relè installati sia nel posto centrale (nella stazione Montesanto), che nei posti periferici in linea (ACEI di stazione). L'impianto consente di comandare da remoto gli enti di piazzale; le verifiche di sicurezza sono realizzate in loco dagli ACEI di stazione.

Il Blocco Elettrico Centralizzato è un sistema di blocco in linea realizzato con circuiti di binario posti solo in ambito stazione: per questo sistema, la linea è suddivisa in sezioni di blocco e ciascuna sezione di blocco è individuata tra il segnale di partenza di una sezione ed il segnale di ingresso della stazione successiva. Pertanto, non vi sono sezioni di blocco in piena linea ed i segnali di stazione sono regolati in modo che ciascuna tratta, compresa tra una stazione e la successiva, sia percorsa da un convoglio alla volta. Tale blocco elettrico è definito centralizzato in quanto dal posto centrale viene bloccato l'itinerario per ciascun convoglio attraverso il telecomando.

In ambito stazione, gli ACEI hanno la funzione di comandare automaticamente i deviatori e l'aspetto dei segnali di ingresso e partenza.

Il funzionamento globale dei tre diversi impianti può essere meglio descritto attraverso il seguente esempio:



**Figura 160. Impianti segnalamento linea Cumana**

In ambito stazione, la linea Cumana è dotata di tre tipi diversi di circuito di binario: il circuito di immobilizzazione deviatoio (blue in figura), il circuito di stazionamento (rosa in figura) ed il circuito di occupazione del segnale (verde in figura). Quest'ultimo ha la funzione di occupare il segnale di ingresso alla stazione (A) anche se non vi sono deviatori manovrabili.

Nell'esempio considerato il Treno 1 sta effettuando servizio viaggiatori ed ha già il via libera cioè il segnale C è verde. Appena impegna il circuito di immobilizzazione deviatoio a valle del segnale C, e quindi prima di entrare in piena linea, l'ACEI della stazione C.V.E. invia a Montesanto la



segnalazione e l'impianto a Montesanto in automatico dispone l'itinerario di linea libero (in quanto è normalmente occupato) ed in questo modo occupa la sezione tra il segnale C ed A per il Treno 1. La logica di sicurezza del sistema prevede che se il Treno 1 ha ricevuto il via libera, cioè il segnale C verde, significa che la sezione C-A è completamente libera e lo è anche quella a valle (la stazione Fuorigrotta non è impegnata).

Nel momento in cui il Treno 1 "batte" il pedale SK0 con il primo asse accadono due eventi:

- tramite l'ACEI di Fuorigrotta, è inviata al posto centrale la prima condizione necessaria, ma non sufficiente per prenotare l'itinerario di linea oltre la stazione di Fuorigrotta;
- viene inviata all'ACEI di Fuorigrotta la richiesta per avere la partenza dalla stazione cioè il segnale C verde.

Solo quando il Treno 1 passa con l'ultimo asse sul dispositivo di fine treno FT0, il posto centrale riceve la seconda condizione necessaria per liberare l'itinerario di linea a valle di Fuorigrotta. Ottenute entrambe le condizioni necessarie (passaggio sul pedale e passaggio sul dispositivo di fine treno), il posto centrale in automatico invia il comando all'ACEI di liberare l'itinerario di linea e l'ACEI dispone il segnale C a verde.

Il posto centrale a Montesanto invia i comandi che non sono sicuri cioè le condizioni di sicurezza per attuarli sono verificate dagli ACEI di stazione. Il Dirigente Centrale Operativo comanda il via libera per la partenza di ogni treno solo per le due stazioni di testa (Montesanto e Torregaveta), mentre per tutte le altre stazioni e fermate in linea il segnale di partenza è posto a via libera in automatico dal sistema attraverso le due condizioni di passaggio sul pedale e sul dispositivo di fine treno. Il DCO può, tuttavia, comandare la partenza da una stazione in linea (cioè mettere il segnale di partenza C a verde), e ciò avviene solo in condizioni di guasto o degrado del sistema, assumendo la dirigenza locale della stazione (con un'apposita procedura sul banco di manovra) ed escludendo l'operatività dell'ACEI di quella stazione.

Questo sistema garantisce la sicurezza di circolazione anche nel tratto a singolo binario della linea: infatti, se ad esempio consideriamo la stessa figura ma con binario singolo il Treno 2 in fermata a Fuorigrotta vede il segnale B rosso fino a quando il Treno 1 non è passato sia sul pedale che sul dispositivo di fine treno. L'itinerario di linea è liberato per il treno che invia per primo entrambe le condizioni necessarie e reso inaccessibile per tutti gli altri.

Attualmente sulla linea Cumana vi è una frequenza massima di 3 treni/h con cadenzamento di 20 minuti.

In appendice sono riportate le tabelle con i valori dei dati di input utilizzati per l'applicazione; sono definiti quattro diversi scenari di simulazione in funzione del sistema di segnalamento implementato sulla linea. In tutti gli scenari si considerano le caratteristiche infrastrutturali attuali

della linea Cumana supponendo (riportate in appendice); tuttavia, la linea è considerata tutta ad intero binario.

Il reaction time del sistema di guida (RT) è uguale per tutti gli scenari e pari a 20 secondi assumendo, quindi, un unico tipo di EVC e di materiale rotabile circolante in linea (si veda l'appendice per le caratteristiche del materiale rotabile).

Per ciascuno scenario di simulazione sono stati calcolati: il minimo headway di linea, la frequenza massima, la capacità nominale ed il ritardo totale misurato per 1 ora di simulazione cioè la somma dei ritardi di tutti i treni in tutte le stazioni per 1 ora di esercizio.

Nella seguente sezione sono descritti i singoli scenari ed i risultati ottenuti dalle simulazioni per la direzione di marcia Montesanto-Torregaveta.

#### Scenario 1: ETCS L1

Il livello ETCS 1 si basa sul distanziamento a blocco fisso. L'implementazione prevede il posizionamento di boe commutative per la funzione di cab signalling e di dispositivi di campagna (circuiti di binario, pedali conta assi, ecc.) sia per rilevare la posizione dei veicoli che per verificarne l'integrità.

Nel caso in esame, le boe commutative sono ubicate in prossimità dei segnali luminosi di linea, quindi la configurazione delle sezioni di blocco resta invariata rispetto allo stato attuale.

L'EVC di bordo definisce il punto di inizio frenatura in base alla capacità frenante del convoglio e della MA ricevuta ad ogni passaggio su una boa commutativa.

Per definire l'obsolescenza della MA trasmessa a mezzo boa, cioè il ritardo di trasmissione  $\delta$ , si sono considerati: il tempo necessario alla Line Side Electronic Unit (LEU) per tradurre l'aspetto del segnale luminoso nel pacchetto informativo da trasmettere alla boa (0,7 s), il tempo di elaborazione dell'EVC del messaggio ricevuto dalla boa più il tempo di visualizzazione della velocità consentita sul cruscotto di guida (1 s). Pertanto, il ritardo di trasmissione  $\delta$  è pari a 1,7 secondi.

#### Scenario 2: ETCS L2

Il livello ETCS 2 si basa ancora sul distanziamento a blocco fisso. L'implementazione prevede la trasmissione della MA attraverso Radio Block Center (RBC). Il sistema di interlocking è ancora presente per la verifica di integrità treno e trasmette al RBC lo stato di occupazione/liberazione delle sezioni di blocco. Ciascun veicolo inoltra la propria posizione direttamente al RBC.

Per definire l'obsolescenza della MA trasmessa dal RBC si considerano: il tempo di trasmissione dall'interlocking al RBC (0,05 s), il tempo di elaborazione del RBC (1,5 s), il tempo per la trasmissione dal RBC al treno follower (1,1 s), il tempo di elaborazione dell'EVC e di visualizzazione sulla MMI (1 s). Pertanto, il ritardo di trasmissione  $\delta$  è pari a 3,65 secondi.

### Scenario 3: ETCS L3

Il livello 3 si basa sul distanziamento a blocco mobile con approccio hard wall. Ciascun veicolo trasmette al RBC la posizione sia della testa che della coda (verifica integrità). Per il calcolo della MA si assume che il leader si arresti istantaneamente (approccio hard wall).

Per definire l'obsolescenza della MA trasmessa dal RBC si considerano: il tempo di verifica integrità (4 s), il tempo per la trasmissione dal treno leader al RBC (1,1 s), il tempo di elaborazione del RBC (1,5 s), il tempo per la trasmissione dal RBC al treno follower (1,1 s), il tempo di elaborazione dell'EVC e di visualizzazione sulla MMI (1 s). Pertanto, il ritardo di trasmissione  $\delta$  è pari a 8,7 secondi.

### Scenario 4: ETCS L3 soft wall

Questo scenario differisce da quello ETCS L3 solo per quanto riguarda il calcolo della MA: in questo caso, infatti, si assume che il leader decelererà con una decelerazione massima di emergenza. I ritardi di trasmissione sono gli stessi di quelli adottati per lo scenario 3.

La seguente tabella riassume i risultati ottenuti per i diversi scenari:

**Tabella 8. Risultati della simulazione degli scenari sulla linea Cumana**

<b>Livello operativo</b>	<b>Tipo di blocco</b>	<b>Ritardo trasmissione [s]</b>	<b>H<sub>min</sub> [min : s]</b>	<b>C<sub>N</sub> [veicoli/h]</b>
ETCS L1	fisso	2	5 min 49 s	10,3
ETCS L2	fisso	4	4 min 30 s	13,4
ETCS L3	mobile hard wall	9	2 min 9 s	27,9
ETCS L3	mobile soft wall	9	2 min 2 s	29,5

I valori forniti in tabella 8 sono riferiti al verso di marcia Montesanto-Torregaveta; siccome, generalmente, le caratteristiche infrastrutturali di una linea in un certo verso di marcia non sono mai identiche a quelle del verso opposto (cioè i binari non sono perfettamente simmetrici) i valori

di capacità calcolati per i due versi non coincidono. Pertanto, il valore di capacità nominale di riferimento sarà il minore tra i due.

L'applicazione del modello di guida sviluppato su una linea reale consente di definire quantitativamente la capacità nominale di linea che è possibile realizzare con il blocco mobile soft wall.

Come è possibile notare osservando i valori in tabella la capacità aumenta progressivamente passando da un livello operativo meno evoluto ad uno più evoluto. In particolare, si nota come l'introduzione del blocco mobile (nel livello 3) consente di raddoppiare quasi la capacità di linea. I benefici del livello 3 non consistono solo in un aumento della produzione del servizio di trasporto, ma anche in una sostanziale riduzione dei costi di gestione dell'infrastruttura: infatti, nel livello 3 non sono previsti dispositivi di campagna né per il rilevamento della posizione dei veicoli né per la verifica di integrità e ciò consente di ridurre i costi relativi alla manutenzione ed al consumo di energia elettrica.

L'applicazione del modello consente, inoltre, di confrontare l'incremento di capacità, in termini relativi e non solo assoluti, dovuto al blocco mobile relativo (ETCS soft wall).

Ulteriori sviluppi auspicabili del modello proposto sono la modellazione dell'infrastruttura come rete cioè introducendo nodi di scambio e terminali per simulare le manovre di inversione, gli istradamenti, gli incroci ed i relativi tempi di attuazione; lo sviluppo di un modello che consenta di simulare il consumo di energia elettrica per la trazione dei convogli.

## 6 Conclusioni

Per incrementare la produzione del servizio di trasporto si possono attuare strategie di breve termine o di medio-lungo termine: le modifiche sull'organizzazione del servizio consentono di ottenere variazioni di produzione nel breve periodo con costi di realizzazione relativamente bassi. L'organizzazione del servizio di trasporto, a sua volta, è fortemente condizionata dalle risorse tecnologiche disponibili; infatti, l'efficienza nella gestione della sicurezza della circolazione e della regolarità del servizio dipendono anche dal livello di automazione dei sistemi di monitoraggio e controllo del traffico ferroviario. In particolare, i sistemi utilizzati per gestire la sicurezza di circolazione, i cosiddetti *sistemi di segnalamento*, influenzano la densità del flusso veicolare che è possibile realizzare su un tronco ferroviario e, quindi, la *capacità di trasporto*.

I sistemi di segnalamento tradizionali regolano la densità veicolare applicando la logica di distanziamento a *blocco fisso*, mentre i sistemi moderni sono basati sulla logica di distanziamento a *blocco mobile assoluto*. La ricerca di settore è, infine, orientata a rendere operativi i sistemi di segnalamento basati sul *blocco mobile relativo*.

Nei sistemi di segnalamento a blocco mobile la corrente veicolare è a densità libera; tale blocco è realizzabile solo se le informazioni necessarie al controllo della velocità sono precise, aggiornate in tempo reale e trasmesse in modo continuo nello spazio a ciascun veicolo. Le tecnologie ad oggi disponibili non soddisfano pienamente questi requisiti; infatti, il blocco mobile relativo è studiato solo per scopi di ricerca. In linea teorica, è stato dimostrato che il segnalamento con blocco mobile relativo consente di ottenere i valori massimi di capacità di linea, ma non sono stati ancora quantificati tali effetti.

I software di simulazione ferroviaria di tipo commerciale più diffusi sono basati su modelli microscopici, sincroni e stocastici. Tuttavia, nonostante l'elevata capacità computazionale, presentano alcune carenze sostanziali. Tali carenze consistono, in sintesi, nella non rispondenza ad alcuni requisiti dello standard ETCS, nell'inadeguatezza dei modelli applicati per descrivere il moto fisico dei veicoli. Lo stato dell'arte dei modelli di simulazione ferroviaria ha, inoltre, evidenziato l'assenza di modelli appropriati per simulare il blocco mobile relativo.

Il presente lavoro di ricerca è stato finalizzato allo sviluppo e l'implementazione di un modello di guida per la simulazione dei sistemi ferroviari in grado di risolvere le problematiche appena descritte.

Il modello di guida proposto riproduce le fasi del processo di guida (percezione, decisione e controllo) specificate nel caso di sistemi di segnalamento ETCS (livello operativo 1, 2, e 3) e nel caso di un sistema ETCS L3 con blocco mobile relativo.

Il modello è stato, quindi, applicato per calcolare il *minimo headway* di linea e la *capacità nominale* di una linea suburbana reale (linea Cumana).

Il modello è del tipo “sincrono” quindi ad ogni passo di simulazione è aggiornato lo stato di tutte le componenti del sistema: il moto fisico dei veicoli (cioè le traiettorie) è descritto nel tempo dalla grandezze cinematiche (accelerazione, velocità e spazio) in funzione dello stato raggiunto nello step di simulazione precedente e delle interazioni con le altre componenti. Il processo di simulazione prevede, infatti, la definizione di una serie di variabili intermedie ottenute da altrettanti modelli che riproducono le grandezze e le logiche di funzionamento delle componenti del sistema di trasporto: l’infrastruttura, il materiale rotabile, i dispositivi di segnalamento a bordo veicolo (European Vital Computer), quelli di terra (Interlocking), l’orario di esercizio. Tali modelli forniscono i dati di ingresso necessari al modello di guida per scegliere la strategia di guida (del tipo “accelerazione”, “regime” o “decelerazione”) che garantisce sia il rispetto dell’orario di esercizio che i vincoli relativi alla sicurezza di marcia (velocità massime civili, distanziamento minimo con il veicolo leader, velocità massima del materiale rotabile, ecc.). Tutte le componenti caratteristiche del sistema di trasporto sono descritte in modo disaggregato, infatti il modello sviluppato è del tipo “microscopico”.

Per il calcolo del minimo headway e della capacità nominale il modello di guida è stato implementato in Matlab e l’elevata capacità computazionale consente di svolgere anche simulazioni con approccio stocastico.

Sono state svolte simulazioni in quattro diversi scenari per la linea EAV “Cumana” in cui fissate le caratteristiche infrastrutturali (pendenze, raggi di curvatura, progressive delle stazioni, velocità civili) e quelle del materiale rotabile sono stati analizzati gli effetti di quattro diversi sistemi di segnalamento: ETCS Livello 1, ETCS Livello 2, ETCS Livello 3 ed ETCS Livello 3 con blocco mobile soft wall.

I risultati ottenuti dimostrano che la capacità aumenta progressivamente passando da un tipo di segnalamento meno evoluto (ETCS L1) ad uno più evoluto (ETCS L3). In particolare, si riscontra un raddoppio di capacità passando da un distanziamento a blocco fisso (L1 e L2) ad uno a blocco mobile (ETCS L3) e che il passaggio da un blocco mobile hard wall ad uno soft wall fornisce un ulteriore incremento.

Come successivi sviluppi della ricerca si prevedono l’analisi degli effetti del blocco mobile soft wall su infrastrutture a rete in cui siano riprodotte le operazioni di circolazione nei terminali (manovre di inversione ed istradamenti) e nei nodi di scambio (manovre dei deviatori, passaggi a livello), con i relativi tempi di attuazione, e l’inserimento di un modello di calcolo dei consumi energetici *on line* per valutare gli effetti di strategie di guida basate su criteri di risparmio energetico (e non solo di riduzione dei tempi di percorrenza).

## Appendice

ID Materiale Rotabile	Lunghezza [m]	Massa [ton]	Velocità Massima [km/h]	Percentuale Massa Frenata [%]	Numero assi motore
<i>ETR_400</i>	<i>102</i>	<i>140</i>	<i>100</i>	<i>130</i>	4

**Tabella 9. Dati materiale rotabile**

Progressiva [m]	Velocità Civile [km/h]	Pendenza [-]	Raggio curvatura [m]	Coefficiente Aderenza [-]	Tratto in galleria	Tipo nodo
0	30	0	Inf		1	Stazione
63	30	0	Inf	0.3	1	
137	30	0	Inf	0.3	1	Segnale
150	30	0	Inf	1.3	1	
189	90	0.00206	Inf	0.3	1	
218	45	0.00206	350	0.3	1	
271	90	0.00206	Inf	0.3	1	
394	90	0.00492	Inf	0.3	1	
514	90	0.00433	Inf	0.3	1	
543	90	0.00433	790	0.3	1	
669	90	0	Inf	0.3	1	
1014	90	0	790	0.3	1	
1164	90	0.00073	790	0.3	1	
1250	90	0.00073	790	0.3	1	
1314	90	-0.0011	Inf	0.3	1	
1460	90	-0.0011	2000	0.3	1	
1614	90	-0.0013	Inf	0.3	1	
1881	90	-0.00095	374	0.3	1	
1981	90	-0.00095	374	0.3	1	Segnale
2151	90	-0.00095	Inf	0.3	1	
2207	75	0.00016	600	0.3	1	
2321	30	0.00016	600	0.3	1	
2334	30	0	Inf	0.3	0	
2421	30	0	Inf	0.3	0	Stazione
2466	30	-0.00229	600	0.3	1	
2484	30	-0.00229	600	0.3	1	Segnale
2531	30	-0.00229	600	0.3	1	
2562	90	-0.00229	Inf	0.3	1	
2588	90	-0.00229	Inf	0.3	0	
2634	90	-0.00426	Inf	0.3	0	
2718	70	-0.01021	500	0.3	0	

2736	70	-0.01021	500	0.3	1	
2750	90	-0.00952	Inf	0.3	1	
3013	90	-0.00952	1000	0.3	1	
3149	90	-0.00067	Inf	0.3	1	
3392	90	-0.00067	1000	0.3	1	
3530	90	-0.00614	1000	0.3	1	
3728	90	-0.00983	Inf	0.3	1	
3797	75	-0.01408	568	0.3	1	
3893	90	-0.01408	Inf	0.3	0	
3962	75	-0.01408	546	0.3	0	
3980	75	-0.01408	546	0.3	0	Segnale
4112	75	-0.01408	1111	0.3	0	
4220	30	-0.01408	1111	0.3	0	
4252	30	-0.00053	Inf	0.3	0	
4292	30	0	Inf	0.3	1	
4322	30	0	Inf	0.3	1	Stazione
4421	30	-0.00053	2200	0.3	1	
4424	30	-0.00053	2200	0.3	1	Segnale
4461	90	-0.01247	Inf	0.3	1	
4482	70	-0.01247	2200	0.3	1	
4522	90	-0.01284	Inf	0.3	1	
4920	90	-0.01284	Inf	0.3	1	Segnale
5065	30	0	265	0.3	1	
5087	30	0	Inf	0.3	1	
5164	30	0	Inf	0.3	1	Stazione
5216	30	0	Inf	0.3	1	Segnale
5251	30	-0.00294	Inf	0.3	1	
5347	70	0.00385	283	0.3	0	
5351	70	0.00385	317	0.3	0	
5411	70	0.00385	294	0.3	0	
5529	90	0	Inf	0.3	0	
5809	80	-0.01156	769	0.3	0	
5900	80	0	Inf	0.3	0	
5935	30	0	Inf	0.3	0	
6131	30	0	Inf	0.3	0	Stazione
6163	30	-0.00623	Inf	0.3	0	Segnale
6214	30	-0.00623	4166	0.3	0	
6264	90	-0.00478	Inf	0.3	0	
6509	70	-0.00478	1282	0.3	0	
6569	90	-0.00478	Inf	0.3	0	
6639	30	-0.00376	Inf	0.3	0	
6687	30	-0.00376	1282	0.3	0	
6699	30	0	Inf	0.3	0	



6788	30	0	Inf	0.3	0	Stazione
6919	30	-0.01108	5000	0.3	0	Segnale
6993	80	-0.01009	5000	0.3	0	
7356	90	-0.00706	Inf	0.3	0	
7417	70	-0.00706	275	0.3	0	Segnale
7509	30	-0.00152	255	0.3	0	
7597	30	-0.00152	2174	0.3	0	
7623	30	0	Inf	0.3	0	
7688	30	0	Inf	0.3	0	Stazione
7734	30	-0.00152	Inf	0.3	0	
7805	30	-0.00791	270	0.3	0	
7915	70	-0.00791	355	0.3	0	
7965	70	-0.00177	4167	0.3	0	
8222	70	0	Inf	0.3	0	
8325	30	0	Inf	0.3	0	Stazione
8341	30	0.00083	4167	0.3	0	
8435	30	0.00083	4167	0.3	0	Segnale
8560	70	0.00083	4167	0.3	1	
8697	90	0	Inf	0.3	1	
8878	85	0.00419	1953	0.3	1	
9095	85	0.00377	1812	0.3	1	
9125	85	0	1812	0.3	1	
9376	85	0	1812	0.3	1	
9494	85	0	1812	0.3	1	
9581	85	0.00248	1812	0.3	1	
9738	85	0.00125	1812	0.3	1	
9858	85	-0.0035	1812	0.3	1	
10018	85	-0.0035	1812	0.3	1	
10178	85	-0.0055	1812	0.3	1	
10298	85	-0.00435	1812	0.3	1	
10360	30	-0.00435	1812	0.3	1	Segnale
10443	30	0	Inf	0.3	1	
10512	30	0	Inf	0.3	1	
10568	30	0	Inf	0.3	0	
10594	30	0	Inf	0.3	0	Stazione
10648	30	-0.00139	500	0.3	0	
10692	30	-0.00139	500	0.3	0	Segnale
10833	60	-0.00139	200	0.3	0	
10843	60	-0.00139	800	0.3	0	
10868	60	0	Inf	0.3	0	
11200	60	0	Inf	0.3	0	
11409	30	0	Inf	0.3	0	Stazione
11534	30	0	Inf	0.3	0	

11614	90	0	Inf	0.3	1	
11704	50	-0.01029	246	0.3	1	
11712	50	-0.01029	246	0.3	1	Segnale
11764	60	-0.01029	714	0.3	1	
11816	30	-0.01029	714	0.3	0	
11829	30	0.00125	180	0.3	0	
11943	30	0.00125	Inf	0.3	0	
11954	30	0.00125	400	0.3	0	
11979	30	0	Inf	0.3	0	
11984	30	0	Inf	0.3	0	Stazione
12044	30	0.0038	220	0.3	0	
12082	30	0.0038	220	0.3	0	Segnale
12154	90	0.0038	Inf	0.3	0	
12401	90	0.0038	Inf	0.3	1	
12435	90	0.00982	Inf	0.3	1	
12526	70	0	408	0.3	1	
12531	70	0.00069	408	0.3	1	
12966	70	0.00069	408	0.3	0	
12981	70	0.00069	408	0.3	0	Segnale
13056	90	0	Inf	0.3	0	
13100	30	0	Inf	0.3	0	
13209	30	0	Inf	0.3	0	Stazione
13251	30	0	Inf	0.3	0	
13279	30	0.0007	590	0.3	0	
13303	30	0.0007	590	0.3	0	Segnale
13414	60	-0.00807	686	0.3	0	
13629	90	-0.00807	Inf	0.3	0	
13652	60	-0.00363	266	0.3	0	
13659	60	-0.00363	266	0.3	0	Segnale
13946	90	0	Inf	0.3	0	
14154	30	0	Inf	0.3	0	Stazione
14170	30	0.00272	476	0.3	0	
14217	30	0.00272	476	0.3	0	Segnale
14527	70	0	476	0.3	0	
15032	90	-0.00248	Inf	0.3	0	
15190	70	-0.00433	660	0.3	0	
15418	90	-0.00433	Inf	0.3	0	Segnale
15541	70	-0.00433	1724	0.3	0	
15568	30	0	Inf	0.3	0	
15600	30	0	Inf	0.3	0	
15754	30	0	Inf	0.3	0	Stazione
15783	30	-0.00258	500	0.3	0	Segnale
15863	30	-0.00258	Inf	0.3	0	

16086	90	-0.00258	2000	0.3	0	
16133	90	0	2000	0.3	0	
16213	90	0	Inf	0.3	0	
16268	80	0	427	0.3	0	
16413	80	0	427	0.3	1	
16443	80	0.00194	427	0.3	1	
17069	80	0.00282	427	0.3	1	
17282	80	0	427	0.3	1	
17422	80	0.00338	427	0.3	1	
17582	90	0	Inf	0.3	1	
17630	80	0	348	0.3	1	
17800	80	-0.00206	345	0.3	1	
17885	80	-0.00206	345	0.3	0	
17920	80	-0.00206	345	0.3	0	Segnale
18035	30	-0.00206	Inf	0.3	0	
18100	30	0	Inf	0.3	0	
18204	30	0	Inf	0.3	0	Stazione
18220	30	-0.00108	Inf	0.3	0	Segnale
18310	30	-0.00108	Inf	0.3	0	
18357	65	-0.00303	786	0.3	0	
18533	90	0	Inf	0.3	0	Segnale
19220	90	0	Inf	0.3	0	
19366	70	0	721	0.3	0	
19506	70	0	721	0.3	0	
19602	70	0	397	0.3	0	
19631	30	0	Inf	0.3	0	Segnale
19700	30	0	Inf	0.3	0	
19810	30	0	Inf	0.3	0	Stazione
19910	30	0	Inf	0.3	0	Segnale

**Tabella 10. Dati infrastruttura**

Progressiva [m]	Nome Stazione	Orario	Partenza/Arrivo	Tempo sosta [s]
0	Montesanto	8:01:00	partenza	30
2421	Corso Vittorio Emanuele	8:04:00	partenza	30
4322	Fuorigrotta	8:07:00	partenza	30
5164	Mostra	8:09:00	partenza	30
6131	Edenlandia	8:11:00	partenza	30
6788	Agnano	8:12:00	partenza	30
7688	Bagnoli	8:14:00	partenza	30
8325	Dazio	8:15:00	partenza	30
10594	Gerolomini	8:19:00	partenza	30
11409	Cappuccini	8:21:00	partenza	30

11984	Pozzuoli	8:23:00	partenza	30
13209	Cantieri	8:25:00	partenza	30
14154	Arco Felice	8:27:00	partenza	30
15754	Lucrino	8:30:00	partenza	30
18204	Fusaro	8:34:00	partenza	30
19810	Torregaveta	8:36:00	arrivo	30

**Tabella 11. Dati orario di esercizio**

## Bibliografia

- 14531-1, UNI EN (2005). Metodi di calcolo delle distanze di arresto, di rallentamento e della frenatura di immobilizzazione .
- Leaflet 544-1 FREIN – Performance de Freinage, UIC
- Leaflet 544-2 FREIN – Performance de Freinage, UIC
- Brunger, O., & Dahlhaus, E. (2008). Running Time Estimation. In P. J. Hansen I.A., *Railway Timetable and Traffic: Analysis-Modelling-Simulation*. Eurail Press.
- Chang, C., & Du, D. (1998). Improved optimization method using genetic algorithms for mass transit signalling block-layout design. *Electrical Power Applications, IEE Proceedings, Vol. 145, No. 3*, 266-272.
- Chang, C., & Du, D. (1999, Settembre). Further Improvement Of Optimization Method For Mass Transit Signalling Block-Layout Design Using Differential Evolution. *Electrical Power Applications Vol.146, No. 5*, p. 559-569.
- Coline, C. (2006). Longitudinal Train Dynamics. In I. Simon, *Handbook of Railway Vehicle Dynamics* (p. 239-277). Boca Raton (USA): Taylor & Francis Group.
- Connor, P. (2014). *Railway-technical.com*.
- Daniel, E. (2008). Enhanced ETCS L2/L3 train control system. *Advanced Train Control System* (p. 113-122). Boston: WIT Press.
- D'Ariano, A., & Albrecht, T. (2006). Running Time Re-Optimization During Real-Time Timetable Perturbations. *Computers in Railways X* (p. 531-540). Southampton : WIT Press.
- D'Ariano, A., & Pranzo, M. (2007). An Advanced Real-Time Train Dispatching System For Minimizing The Propagation Of Delays In A Dispatching Area Under Severe Disturbances. *Proceedings of the 2nd International Seminar On Railway Operations Modelling and Analysis*. Hannover.
- D'Ariano, A., Pranzo, M., & Hansen, I. (2007). Conflict Resolution and Train Speed Coordination for solving Real-Time Timetable Perturbations. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 8, No. 2*.
- Dijkstra, E. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik Vol.1*, p. 269-271.
- ERA, U. E. (2014). *System Requirements Specification 026-3.4 (SUBSET 026)*.
- Gill, D., & Goodmann, C. (1992). Computer-Based Optimization Technique for Mass Transit Railway Signalling Design. *Electrical Power Applications Vol. 139 No. 3*, p. 261-275.
- Gill, D., & Goodmann, C. (1992). Computer-based Optimization Techniques for mass transit railway dignalling design. *IEE Proceedings B, Electrical Power Applications, Vol. 139, No. 3*, 261-275.

- Gipps, P. (1981). A behavioural car-following model for computer simulation. *Transportation Research-B, Vol. 15B, No. 2-C*, 105-111.
- Gregor, T., & Sergej, V. (2009). Train Protection. In T. Gregor, & V. Sergej, *Railway Signalling and Interlocking, International compendium* (p. 208-251). Hamburg: Eurail press.
- GROUP, E. U. (2014). *System Requirements Specifications v3.1*.
- Happel, O. (1959). Sperrzeiten als Grundlange fur die Fahrplankonstruktion. *Eisenbahntechnische Rundschau, Vol. 8, No. 2*, 79-90.
- Hauptmann, D. (2000). *Automatic and Non-Discriminatory Train Path Allocation In Railway Networks of Arbitrary Size*. Hestra Verlag: Universitat Hannover.
- Hill, R. J., & Yates, T. (1992). Modelling railway block signalling systems using discret-event simulation. *IEEE Xplore Digital Library*.
- Jacobs, J. (2003). Rechnergestutze Konfliktermittlung und Entscheidungsunterstutzung bei der Disposition des Zuglaufs. *Ph.D. Thesis*. Aachen: Vroffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Institutes der RWTH.
- Jacobs, J. (2004). Reducing Delays by Means of Computer-Aided “On-The-Spot” Rescheduling. *Computers in Railways IX* (p. 603-612). Southampton: WIT Press.
- Ke, B. R., Chen, M. C., & Lin, C. (2009, Giugno). Block-Layout Design Using Max-Min Ant System for Saving Energy On Mass Rapid Transit Systems. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems Vol. 10 No. 2*, p. 226-235.
- Kettner, M. &. (2001,2002,2003).
- Kettner, M., Sewcyk, B., & Eickmann, C. (2003). Integrating microscopic and macroscopic models for railway network evaluation. *Proceedings of the European Transport Conference*. Strasbourg.
- Kroon, L., Dekker, R., & Vromans, M. (2007). Cyclic railway timetabling: a stochastic optimization approach . *Algorithmic Methods for Railway Optimization* .
- Marinov, M., & Viegas, J. (2011). A mesoscopic simulation modelling methodology for analyzing and evaluating freight train operations in a rail network. *Simulation Modelling Practice and Theory Vol. 19*, 516-539.
- Martinez, B., Vitoriano, A., Fernandez, A., & Cucala, A. (2007). Statistical dwell time model for metro lines. *WIT Transactions on the Built Environment, Vol. 96* , 223-232.
- Middelkoop, D., & Bouwmann, M. (2000). Train network simulator for support of network wide planning of infrastructure and timetables. *Computers in Railways VII* (p. 267-276). Southampton : WIT Press.
- Middelkoop, D., & Bouwmann, M. (2002). Testing the Stability of the Rail Network. *Computers in Railways VII* (p. 995-1002). Southampton: Witt Press.

- Nash, A., & Huerlimann, D. (2004). Railroad simulation using Open-Track. *Computers in Railways IX*. Southampton: WIT Press.
- Nordeen, M. (1996). Stability Analysis of Cyclic Timetables for a Highly Interconnected Rail Network. *PhD Thesis*. Lausanne: Swiss Federal Institute of Technology (EPFL).
- Radtke, A. (2005). *Software tools to model the railway operation*. Hannover: EurailPress.
- Radtke, A., & Watson, R. (2007). Railway simulation in the United Kingdom. *RTR No. 1*, 24-28.
- Schumacher, A. (2004). *A hybrid method for vehicle allocation in rail traffic*. Hannover: EurailPress.
- Serafini, P., & Ukovich, W. (1989). A mathematical model for Periodic Event Scheduling Problems. *SIAM Journal of Discrete Mathematics*, Vol. 2, 550-581.
- Sewczyk, B., Radtke, A., & Wilfinger, G. (2007). Combining microscopic and macroscopic infrastructure planning models. Hannover: Proceedings LAROR.
- Siefer, T., & Radtke, A. (2005). Railway simulation, key for operation and optimal use. *Proceedings of the 1st International seminar of Railway and Operations Modelling and Analysis*. Delft: the Netherlands.
- Takagi, R. (2012). Synchronisation control of trains on the railway track controlled by the moving block signalling system. *IET Electrical Systems in Transportation*, Vol. 2, 130-138.
- Tang, T., & Li, K. (2007, April). Traffic modelling for moving-block train control system. *Communication in Theoretical Physics*, Vol. 47, No. 4, p. 601-606.
- UNI. (2003). EN 14352-1: Mass transit brake systems – Performance requirements.
- Verkehrswissenschaftliches Institut - Aachen. (2008). *Influence of ETCS on line capacity, Generic study*. Aachen: International Union of Railways (UIC).
- Vicuna, G. (1993). *Organizzazione e tecnica ferroviaria*. Roma: C.I.F.I.
- Wegele, S., & Schnieder, E. (2004). Dispatching of Train Operations Using Genetic Algorithms. *Proceedings of the 9th International Conference on Computer-Aided Scheduling of Public Transport*. San Diego: CD-ROM.
- XU, Y., Cao, C., Li, M., & Luo, J. (2012). Modeling and simulation for urban rail traffic problem based on cellular automata. *Communications in Theoretical Physics*, Vol. 58, 847-855.
- Yuan, J. (2006). *Stochastic modelling of train delays and delay propagation in stations*, PhD Thesis. Delft: University of Technology.